

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

10073.

В. ПЕТРОВ



**Оптика
фотогра-
фического
объектива**

10073

В. П е т р о в

**О П Т И К А
ф о т о г р а ф и -
ч е с к о г о
о б ' е к т и в а**

Сектором подготовки кадров ГУКФ
рекомендовано в качестве учебного
пособия для ВУЗ'ов, подготавливающих
инженеров кино-фото-промышленности

К И Н О Ф О Т О И З Д А Т
М О С К В А ● 1 9 3 5

В. В. ПЕТРОВ. Оптика фотографического объектива.

Автор книги в течение 18 лет работает на оптических заводах в качестве научного руководителя и преподает курс оптических приборов в вузах.

Книга является систематическим руководством по оптике фотографического объектива, написанным на основе последних данных по этому предмету. Курс составлен применительно к программе Государственного института кинематографии (Москва), изложен в форме простых геометрических построений, не требующих математических познаний и доступен кругу лиц, интересующихся фотографической оптикой.

Предисловие

До революции в России не было своей оптической промышленности и тем более производства фотооптики. Все, что у нас имеется сейчас в этой области—создано при советской власти.

Начало развития собственной, советской оптико-механической промышленности следует отнести к 1920 г. В это время мы уже приступили к опытной варке сырого оптического стекла, начали производство менее сложных оптических деталей из своего стекла и налаживали организацию производства оптических приборов на своих оптико-механических заводах.

К 1924—25 гг. мы освоили в основном производство сырого оптического стекла и организовали несколько новых оптико-механических заводов. С этого момента наша молодая оптическая промышленность начала постепенный выпуск киноаппаратуры, биноклей, луп, очковых стекол, прецизионных оптических приборов и т. д.

Изучение лучших зарубежных образцов, овладение расчетной техникой по вычислению оптических систем и введение современных методов производства на наших заводах—позволило приступить к изготовлению и более сложных приборов, в том числе и фото-кинообъективов.

В результате, успехи нашей оптической промышленности, требующей большой культуры и знания целого ряда научных дисциплин, на сегодняшний день значительны. Мы овладели процессом изготовления ряда сложнейших оптических приборов, но пройденный этап по времени еще слишком мал, чтобы сказать сегодня о возможности полного удовлетворения потребителя любым оптическим прибором. Номенклатура оптических приборов (по одному лишь разделу фотооптики, мы должны выпустить более 37 различных моделей фотообъективов), крайне сложна и многогранна, поэтому на ближайший период 2—3 лет, мы еще будем вынуждены, в отдельных случаях, пользоваться образцами фотообъективов зарубежного производства в области технической фотографии (репродукция и т. д.).

В настоящее время у потребителей находится весьма большое количество фотообъективов зарубежного производства, причем группа съемочных кинообъективов представлена пока исключительно иностранными образцами. Так как в ближайшее время наша советская оптическая промышленность в производстве фото-кинооптики пойдет по пути изготовления оптики на основе

изучения и исследования оригинальных фотообъективов, элементы которых послужили основанием и для производства лучших заграничных образцов, то, естественно, изучение оптики фотографического объектива должно идти через ознакомление с тем богатейшим материалом, который нам дала мировая оптическая промышленность на протяжении 75-летнего своего существования.

Наличие в СССР большого количества иностранных фотокинообъективов, о которых мы упомянули выше и которыми будут пользоваться еще долгое время (до их естественного износа), заставило автора настоящей книги особо обратить внимание на более полное описание отдельных заграничных фотообъективов с тем, чтобы указанный материал облегчил правильную эксплуатацию и умелое использование того или иного объектива.

Успехи советской оптической промышленности в деле освоения производства фотооптики служат гарантией к скорому и полному освобождению СССР от иностранной зависимости. Вся фотоаппаратура как профессионального, так и любительского типа, выпускаемая трестом ВООМП—целиком и полностью уже снабжается оптикой собственного производства. Сейчас на очереди стоят работы по изготовлению лучших светосильных анастигматов (для киносъемки), объективов для репродукционных работ, апохроматов и т. д.

Успешное завершение этих работ в 1936 г., полностью и окончательно избавить СССР от ввоза заграничной фотооптики.

Глава I. Основные свойства света

I. Природа лучистой энергии (света)

Для разрешения вопроса о физической природе световых лучей огромное значение имело открытие того, что исходящий от звезд или от земных источников свет требует определенного измеряемого времени, чтобы дойти от места своего возникновения к месту восприятия.

Основатель классической механики И. Ньютон (XVII в.) сделал наиболее вероятное предположение, что определенные мельчайшие частицы, летящие от источника света и движущиеся по законам механики, попадая в наш глаз, вызывают ощущение света. Таким образом теория истечения света (корпускулярная теория) Ньютона по существу сводилась к простым механическим законам. Подтверждая ряд известных в то время оптических явлений, как-то, прямолинейное распространение света, равенство угла падения углу отражения и пр., корпускулярная теория все же не могла объяснить явлений интерференции, разности скорости распространения света в средах разной плотности и т. д.

Не входя в более детальное изложение ньютоновской теории истечения, следует отметить, что, достигнув почти полного признания, теория эта господствовала в течение целого столетия, несмотря на целый ряд противопоставлений, более пригодных для объяснения отдельных явлений лучистой энергии.

Вскоре после появления ньютоновской теории истечения современником Ньютона—Христианом Гюйгенсом—была создана и развита в его прекрасной монографии о природе света другая теория света—волновая.

По Гюйгенсу, свет представляет собой особого рода колебания, а процесс распространения света состоит в том, что колебания эти, возникнув в какой-либо точке пространства, в свою очередь возбуждают колебания в смежных с ней точках и т. д. Дальнейшее развитие волновой теории света работами Юнга (1802—1804 гг.) и в особенности Френеля нанесло сокрушительный удар ньютоновской теории истечения.

В известном опыте Френеля (1816 г.) с двумя плоскими зеркалами, освещенными через узкую щель солнечным светом, было получено несомненное доказательство интерференции. В упомянутом опыте свет от плоских зеркал отражался на экран, причем на каждую точку экрана свет падал от обоих зеркал. Ввиду того, что плоскости зеркал не совпадали между собой, длина

пути обоих отраженных от зеркал лучей неодинакова. В тех точках экрана, в которых разность хода (разность длины пути обоих лучей) равна была четному числу волн, получалось более яркое освещение экрана, в точках же, где разность хода обоих лучей была равна нечетному числу волн, яркость освещения экрана уменьшалась. Этим опытом были подтверждены те классические основы волновой теории света, которые являются и в настоящее время исходной точкой некоторых наших рассуждений.

С момента зарождения волновой теории света, Гюйгенс сравнивал скорость света со скоростью звука: как от звучащего тела, так и от брошенного в воду камня по всем направлениям с равномерной скоростью распространяются не частички воздуха или воды, а их сгущения и разрежения, т. е. видоизменяется не сама материя, а определенное состояние ее. На основании изложенного Гюйгенсу необходимо было положить в основу своей теории некоторую материальную среду—световой эфир, колебания которого воспринимаются глазом в качестве световых колебаний.

Открытие поляризации света привело к выводу, что колебания, имеющие место в световых волнах, поперечны, т. е. происходят в плоскостях, перпендикулярных к направлению распространения света. Следовательно эфир не жидкость и не газ, так как теория упругих колебаний доказывает, что к поперечным колебаниям способны только твердые тела. Если считать, что скорость распространения волн равна квадратному корню из упругости среды, в которой распространяются волны, деленной на плотность этой среды, то эфир при скорости света в $300\,000\text{ км/сек.}$ должен быть твердым телом. В твердых телах волны бывают и поперечные и продольные, но все попытки обнаружить продольные световые волны в эфире оказались тщетными. Пришлось считать эфир твердым телом с каким-то особым свойством.

Следует заметить, что за время своего существования в особенности в 1850 г. теория материального эфира претерпела значительную эволюцию. Эта эволюция была обусловлена новым открытием—электромагнитной теорией света. В 1837—1840 гг. Фарадей заметил, что между двумя электрическими зарядами существует определенная закономерность в направлении в пространстве—один из зарядов находится в строгом подчинении действию другого.

Для упомянутого электрического взаимодействия тел оказалось необходимым наличие промежуточной среды, совершенно так же, как это было необходимо в рассмотренном нами случае передачи световых колебаний. Таким образом к световому эфиру Фарадей прибавил электромагнитный эфир как материальный носитель электромагнитных сил.

Но Фарадей недостаточно систематизировал свои наблюдения, и потребовалась напряженная работа математика и физика Максвелла (1850 г.), который с замечательным совершенством сформулировал взгляды Фарадея и развил теорию электромагнитной природы света. Эта теория привела его к смелому выводу, что каждое электрическое возмущение распространяется от места своего возникновения в пустом пространстве волнообразно со скоростью $300\,000\text{ км/сек.}$ Как видим, указанная скорость точно совпадает с величиной скорости света. Это дало Максвеллу повод рассматривать свет как электромагнитное явление. Предсказанные Максвеллом электромагнитные волны были обнаружены и изучены Герцем.

Опыты и исследования как самого Герца, так и его последователей с несомненностью установили величайшее сходство между волнами световыми и волнами электромагнитными. Как те, так и другие являются волнами поперечными, тождественно ведут себя в случаях отражения, преломления, поляризации, интерференции и т. д.

Волны Герца (радио), Рентгена и световые волны отличаются друг от друга только своей длиной. Словом, световые (видимые) волны занимают лишь небольшой участок в общей системе электромагнитных волн.

Электромагнитная теория света полностью упразднила теорию истечения света Ньютона. Теория материального эфира также подвергалась сильным изменениям. В 1850 г., как мы уже отметили выше, электромагнитная теория света значительно эволюционизировала теорию материального эфира, а к концу XIX в. теории материального эфира был нанесен окончательный удар. Мы имеем в виду опыты по изучению оптических явлений в движущихся телах, произведенные Майкельсоном и Лорентцем, а также работы Эйнштейна по его теории относительности. Упомянутые работы привели к созданию теории абсолютно неподвижного эфира, т. е. эфира, лишенного всякого физического содержания. Итак с поражением теории материального эфира световые колебания пришлось мыслить в пустоте, без всякого материального носителя.

К началу XX в. на основании новых фактов взгляд на природу света значительно изменился: волновая трактовка света была поставлена под сомнение, и на сцену появилась совершенно новая теория природы света—теория квантов.

Теории квантов предшествовала весьма большая работа по изучению распределения энергии в спектре, так называемого черного излучения.

В 1900 г. М. Планк окончательно сформулировал свой закон лучеиспускания в следующем виде: лучистая энергия испускается и поглощается определенными центрами лучеиспускания.

Центрами испускания и поглощения лучистой энергии являются атомы и молекулы. Дальнейшее развитие гипотезы световых квантов начинается с опубликованной в 1905 г. работы Эйнштейна о квантах энергии. На основании ряда исследований Эйнштейн пришел к заключению, что **определенный источник света может испускать или поглощать энергию только в количествах, всегда равных $h\nu$** , где h —постоянная Планка, одинаковая для всех источников света, и ν —частота колебания источника. В конечном итоге как упомянутая работа Эйнштейна, так и работы других ученых привели к выводу, что испускание атомом или молекулой энергии—процесс прерывный, протекающий, как взрыв.

Указанное и послужило для Планка основанием сформулировать свою теорию квантов, приводимую здесь в следующей редакции, заимствованной нами из книги О. Д. Хвольсона „Физика наших дней“: „**Лучистая энергия испускается и поглощается не непрерывной струей (как об этом думали до Планка.—В. П.), но отдельными количествами вполне определенной величины, как бы отдельными порциями или каплями. Эти отдельные количества, которые по аналогии можно назвать атомами лучистой энергии, называются квантами.**“

Величина кванта может быть выражена так:

$$E = h\nu,$$

где, как видно, квант зависит от рода луча, следовательно квант пропорционален частоте колебаний— ν . Совершенно очевидно, что величина кванта обратно пропорциональна длине волны и что поэтому с уменьшением λ кванты возрастают. Таким образом под величиной кванта следует понимать определенное количество энергии, которое в какой-либо момент времени сразу выбрасывается или поглощается атомом или молекулой.

В настоящее время теоретическая часть оптики все еще находится в некотором переходном состоянии. Для весьма большой группы явлений, имеющих место как в геометрической, так и в физической оптике, мы находим исчерпывающие объяснения с точки зрения основ классической волновой теории света. Однако в целом ряде действий света на материю (фотохимия) и в процессах возникновения света (спектроскопия) мы обнаруживаем явления, объяснение которых возможно только на основе учения о квантах.

Волновая теория не могла научно объяснить реакцию действия на фотографическую пластинку лучей короткой длины волны, а также отсутствие реакции для лучей с $\lambda > 7800\text{Å}$. С точки зрения световых квантов это явление объясняется точно и неоспоримо.

Как нам уже известно, фотохимическая реакция может иметь место только в случае поглощения данным веществом лучистой энергии. По закону Эйнштейна, приложившего квантовую теорию света к фотохимическим явлениям, каждому поглощенному кванту энергии соответствует элементарная химическая реакция, т. е. на каждую молекулу, участвующую в фотохимической реакции, приходится один квант поглощенной лучистой энергии. Согласно указанному закону, каждому поглощенному кванту энергии соответствует распад одной бромосеребряной молекулы с освобождением одного атома серебра. Следовательно фотохимическое явление происходит тем интенсивнее, чем больше величина кванта $E = h\nu$, выраженного в эргах, а величина кванта, как мы видели выше, зависит от частоты колебания ν .

2. Распространение лучистой энергии

Условимся понимать природу распространения лучистой энергии как колебания электромагнитного характера, происходящие в направлении, перпендикулярном движению света. Скорость распространения света в пустоте постоянна ($3 \cdot 10^{10}$ км/сек) и не зависит от рода луча; в пространстве же, содержащем материю, скорость света зависит не только от свойства среды, но и от рода луча.

Световым лучом мы называем прямую линию, вдоль которой распространяется свет. Совокупность световых лучей дает световой пучок, который может быть параллельным, расходящимся или сходящимся. На рис. 1 изображен пучок параллельных лучей, идущих в виде плоских волн от бесконечной удаленной светящейся точки. На рис. 2 даны: слева—пучок расходящихся от центра лучей и справа—пучок сходящихся к центру лучей. Эти лучи исходят от светящейся точки (действительной или мнимой), находящейся на конечном расстоянии, причем они идут уже в виде сферических, а не плоских волн.

Прямолинейное распространение лучистой энергии подтверждается тем, что, помещая непрозрачное тело между источником света и нашим глазом на одной с ними прямой, мы не увидим источника. Этим примером объясняется всем известное явление получения изображения в так называемой камере-обскуры, представленной на рис. 3.

В такой камере получается совершенно точное (в отношении масштаба) изображение предмета вследствие прямолинейного распространения света от различных точек объекта.

Необходимо все же отметить, что при очень малых отверстиях проходящие лучи теряют прямолинейность, образуя явление, называемое дифракцией, о чем подробнее будет сказано ниже.

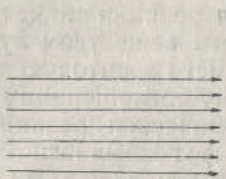


Рис. 1.

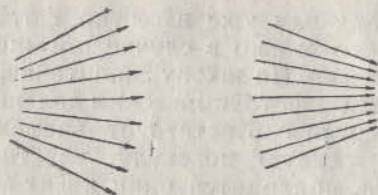


Рис. 2.

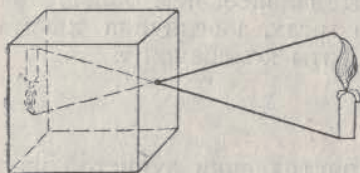


Рис. 3.

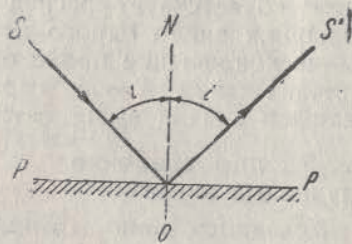


Рис. 4.

Приведем два основных закона распространения света: первый закон утверждает, что в однородной среде лучистая энергия распространяется прямолинейно, а второй основной закон состоит в подтверждении независимого распространения лучей, т. е. такого порядка их прохождения, когда различные лучи в различных направлениях распространяются, не мешая друг другу.

Остановимся несколько на некоторых явлениях, происходящих при распространении лучистой энергии в прозрачной среде. Всякая среда, как бы она ни была прозрачна, поглощает часть распространяющейся в ней лучистой энергии, преобразуя ее в тепловую или химическую. Кроме того некоторые сорта оптического стекла, из которого изготавливаются фотографические объективы, имеют склонность не только поглощать лучистую энергию, но и рассеивать часть ее в разные стороны (диффузия). И последнее, что следует отметить, это возможность некоторой флуоресценции и фосфоресценции в определенных сортах оптического стекла при прохождении в них световых лучей.

3. Законы

отражения

Отражение от плоской поверхности

Если на пути падающего светового луча поместить под некоторым углом кусок плоского стекла с хорошо полированной поверхностью (зеркальное стекло), то часть света пройдет стекло, часть будет поглощена стеклом, но большая часть отразится от полированной поверхности.

Рассмотрим простейший случай отражения параллельного пучка лучей от плоского зеркала. На рис. 4 PP —поверхность плоского зеркала, на которую падает параллельный луч SO ; отразившись от зеркала PP , луч пойдет по направлению OS' . Линия NO , перпендикулярная плоскости PP , называется нормалью. Угол SON —угол падения, обозначенный буквой i ; угол NOS' называется углом отражения и обозначен буквой i' . Для зеркального отражения имеем следующий закон: луч падающий, нормаль и луч отраженный находятся в одной плоскости; угол падения i равен углу отражения i' . Ввиду того, что падающие и отраженные лучи находятся на противоположных сторонах от нормали, при равенстве $i=i'$ абсолютные величины противоположны по знаку.

Рассмотрим случай отражения расходящегося пучка лучей (рис. 5).

Лучи такого пучка, выходящие из точки S , по приведенному выше закону отражения, пойдут от плоского зеркала по направлениям O_1S_1 , O_2S_2 и O_3S_3 . Продолжая пунктиром направление отраженных лучей, найдем их пересечение в точке S' ; эта точка является мнимым изображением точки S . Совершенно очевидно, что отрезок SN равен NS' , следовательно расстояние позади зеркала до точки S' на нормали одинаково с расстоянием до находящейся перед зеркалом точки S . Глазу наблюдателя, смотрящего в зеркало, будет казаться, что он видит в S' светящуюся точку, реально не существующую.

Так как в большинстве случаев стеклянная пластинка всегда ограничена двумя отражающими поверхностями, то отражение будет происходить как от передней, так и от задней поверхности. Разумеется, в случае зеркала максимум отраженных лучей получим от последней—посеребренной поверхности, но и первая поверхность зеркала даст слабое изображение. Последнее обстоятельство заставляет пользоваться в некоторых случаях зеркалом с посеребренной передней поверхностью для получения только одного изображения.

Хорошо отполированное зеркало с точной плоскостью дает совершенно правильное изображение с некоторым „обращением“, заключающимся в том, что левая сторона объекта изображается плоским зеркалом как правая, и обратно (при параллельности зеркала плоскости объекта).

Отражение от сферической поверхности

Законы отражения от плоского зеркала применимы и к сферической поверхности, если взять на сферической поверхности очень малую площадку и принять ее за плоскость. Очевидно, что нормалью к такой малой площадке является радиус кривизны данной сферической поверхности.

На рис. 6 дано построение отраженного луча от вогнутого зеркала. Луч SO , параллельный оси MM' сферической поверхности с центром N , падает под некоторым углом i к нормали (в нашем случае — радиусу сферической поверхности) ON и отражается под углом i' по направлению OS' . Допустим, что угол i весьма мал (будем пользоваться параксиальными — нулевыми лучами), т. е. луч SO идет близко к оси MM' ; в таком случае дуга OM' будет равна перпендикуляру, опущенному из точки O на ось MM' . Обозначая расстояние от вершины поверхности зеркала до светящейся точки $SM' = S$, расстояние от вершины поверхности зеркала до изображения светящейся точки — $S'M' = S'$ и расстояние $ON = r$, после некоторых преобразований получим известную формулу

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2}{r}, \quad (1)^1$$

¹ Справедливость этой формулы, как и формулы (4) нетрудно проверить. Обозначив через h величину перпендикуляра, опущенного из точки O на ось MM' (рис. 6) будем иметь:

$$\frac{h}{S} = \operatorname{tg} U$$

$$\frac{h}{S'} = \operatorname{tg} U'$$

$$\frac{h}{r} = \operatorname{tg} \varphi$$

Заменяя тангенс углом (по малости углов), получим:

$$U + U' = 2\varphi$$

$$U' = S + \varphi$$

$$\varphi = U + S$$

Подставляя значение тангенсов в значение углов, имеем:

$$\frac{h}{S} + \frac{h}{S'} = \frac{2h}{r}$$

или

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{2}{r}$$

Уравнение (4) переходит в указанное выше, если положить, что

$$S = f + x$$

и

$$S' = f' + x'$$

откуда

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{f + x}$$

и

$$\frac{1}{S'} = \frac{1}{f' + x'}$$

Значение f и f' , x и x' смотри на стр. 36 формулы (32), (33) и (34).

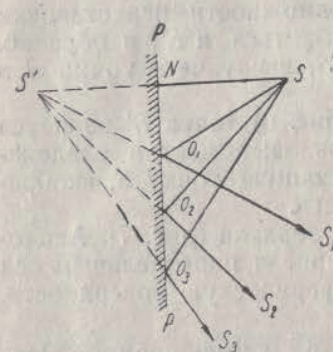


Рис. 5.

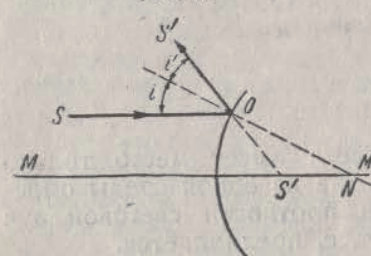


Рис. 7.

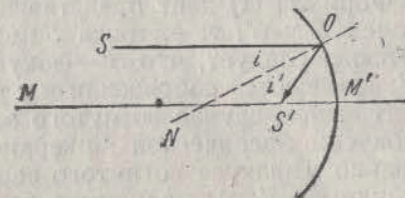


Рис. 6.

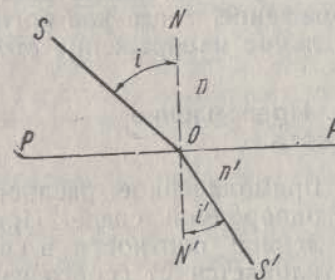


Рис. 8.

связывающую расстояние светящейся точки, ее изображения и радиус кривизны сферической поверхности (временю мы опускаем правило знаков для S , S' и r). Так как в рассмотренном нами рис. 6 светящая точка находится в бесконечности, то $S = \infty$; тогда $\frac{1}{S}$ будет равно нулю, и формула (1) примет следующий вид:

$$\frac{1}{S'} = \frac{2}{r}. \quad (2)$$

Точка S' называется фокусом сферической поверхности, а расстояние $M'S'$ — фокусным расстоянием, обозначаемым буквою f ; следовательно

$$S' = f = \frac{r}{2}. \quad (3)$$

Последнее уравнение (3) подтверждает, что фокусное расстояние сферического зеркала равно половине радиуса кривизны; тогда:

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}. \quad (4)$$

Формула (1) дает представление о возможности перестановки точек S и S' , т. е. точка S может находиться в S' , и наоборот. Отсюда следует, что S' —фокус точки S , ввиду чего точки S и S' называются сопряженными точками.

В нашем случае вогнутого зеркала (рис. 6) точка S' является фокусом сферической поверхности зеркала; поместив следовательно в фокусе вогнутого зеркала светящую точку S , изображение ее S' мы получим в бесконечности.

Рассмотрим отражение от выпуклого зеркала (рис. 7). Аналогично отражению луча от вогнутого зеркала параллельный оси MM' луч SO , падающий на выпуклую сферическую поверхность, отразится в направлении OS' .

Выпуклое зеркало дает прямое, мнимое и уменьшенное изображение, тогда как вогнутое зеркало дает обратное и действительное изображение объекта.

4. Преломление света

Прямолинейное распространение света имеет место только в однородной среде. При переходе же из одной среды определенной плотности в среду другой плотности световой луч отклоняется от своего направления, т. е. преломляется.

На рис. 8 PP —поверхность, разделяющая две разные по плотности среды— n и n' ; луч SO , проходя среду n , встречает плоскую границу раздела среды n' и преломляется. Угол SON называется углом падения и обозначен буквой i ; угол $S'ON'$ —угол между нормалью и преломленным лучом—обозначен буквою i' и называется углом преломления.

Закон преломления может быть сформулирован в следующем виде.

1. Луч падающий, нормаль в точке падения и луч преломленный лежат в одной плоскости.

2. Отношение синуса угла падения i к синусу угла преломления i' —есть величина постоянная, равная отношению скоростей распространения лучистой энергии в первой и во второй средах.

Это отношение и называется коэффициентом преломления n :

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{V_1}{V_2}, \quad (5)$$

где V_1 и V_2 —скорости распространения волн для первой и второй сред.

В рассмотренном нами случае преломления (рис. 8) согласно

закону Снеллиуса можно вывести следующую простую формулу:

$$n \sin i = n' \sin i'. \quad (6)$$

Если считать, что первая среда в нашем примере—воздух, то $n=1$ и

$$\sin i = n' \sin i' \quad (7)$$

или

$$n' = \frac{\sin i}{\sin i'}. \quad (8)$$

Показатель преломления данной среды по отношению к пустоте („воздуху“) называется абсолютным показателем преломления среды, обозначаемым буквой n .

Таким образом, обобщая наши рассуждения, выводим, что показателем преломления n считается обратная величина отношения скорости света в одной среде к скорости света в другой среде, принятой за единицу (воздух).

Следовательно, зная n , можно определить скорость света в данной среде.

На основании формулы (6) можно вывести следующее заключение: если показатель преломления n —первой среды меньше показателя преломления n' —второй среды, то угол падения i всегда больше угла преломления i' ; если же $n > n'$, то $i < i'$. В силу изложенного из упомянутой формулы (6) выводится также и закон обратимости светового луча,

Перейдем теперь к рассмотрению случая преломления света при прохождении через плоскопараллельную пластинку.

На рис. 9 луч SO падает из воздуха на первую границу пластинки P_1P_1 под углом i ; преломившись в точке O , луч в стекле, приближаясь к перпендикуляру N' , имеет угол преломления i' . Далее луч падает в стекле на вторую границу пластинки P_2P_2 в точке O' , и так как плоскости P_1P_1 и P_2P_2 параллельны, то угол падения равен $i' = i'_1$. Претерпев преломление при выходе из стекла в воздух, луч удаляется от перпендикуляра в направлении S' . По закону обратимости угол i'_1 преломления в воздухе луча $O'S'$ равен начальному углу падения i ; вследствие этого луч, прошедший сквозь плоскопараллельную пластинку, не меняет своего направления, а только смещается несколько в сторону.

Величину смещения e можно определить следующей формулой:

$$e = d \frac{\sin (i - i')}{\cos i'}, \quad (9)$$

где d — толщина пластинки. Из формулы видно, что смещение луча будет тем значительнее, чем толще пластинка и больше угол падения i .

5. Дисперсия света

Под дисперсией света следует понимать явление разложения света при его преломлении. Изучение явления дисперсии сводится к изучению способов и результатов исследования составных сложных пучков лучистой энергии, содержащих лучи различной длины волны.

Этому вопросу посвящен специальный отдел оптики, называемый спектроскопией.

Рассматривая вопрос преломления света, мы имели дело со светом одной длины волны, т. е. монохроматическим. В действительности же так называемый белый свет является составным из разных длин волн.

Если пучок параллельных лучей пропустить в темную комнату на экран через круглое отверстие, то на экране получится круглое белое пятно.

Если же на пути хода лучей поставить стеклянную призму (рис. 10) и заставить параллельный сложный пучок света преломиться в призме, то по выходе его из призмы, кроме известного нам отклонения лучей, получим на экране ряд накладываемых друг на друга цветных круглых отверстий в виде вытянутой цветной полосы, у которой один край будет красным, а другой — фиолетовым.

Такое окрашенное изображение называется спектром. Заметим, что в нашем опыте фиолетовая часть полосы будет отклонена призмой сильнее, нежели красная.

Упомянутый опыт доказывает, что падающий на призму белый луч S при преломлении разлагается на отдельные цветные лучи и что следовательно белый свет не является однородным, но состоит из многочисленных цветных лучей различной длины волны.

Так как скорость света убывает с уменьшением длины световой волны, то отсюда следует, что показатель преломления будет, наоборот, возрастать. Этим и объясняется более значительное отклонение по выходе из призмы лучей фиолетовой части спектра, нежели красной, так как лучи первой, имея меньшую длину волны, преломляются под большим углом.

Таким образом мы можем утверждать, что скорость распространения волн разной длины различна и что, чем меньше длина волны, тем медленнее ее распространение и тем больше показатель преломления. Следовательно для каждой длины волны одна и та же преломляющая среда имеет различные показатели преломления.

Глаз человека видит отдельные цвета в спектре только в определенном интервале, в пределах световых волн длиной от 0,7685 до 0,400 μ . За этими пределами глаз уже ничего не видит.

Приведенный интервал различных цветов спектра по Ньютону состоит из семи основных (главных) цветов: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего и фиолетового. Но такое деление в настоящее время считается не совсем правильным, так как некоторые из этих цветов получились путем наложения одного цвета на другой. Такие цвета не имеют достаточной чистоты и сочности и занимают весьма узкое место в спектре. Более правильным считается деление спектральной полосы на три главных части, а именно: красную, желто-зеленую и сине-фиолетовую.

Отдельные цвета спектра принято обозначать по Фраунгоферу буквенными обозначениями. Ниже дается таблица видимой глазом части спектра с указанием длины волны, цвета и буквенного обозначения.

Длина волны в μ	Цвет	Буквенное обозначение
768,5	Красный	A'
656,3	"	C
589,3	Желтый	D
587,6	"	d
546,1	Зеленый	e
486,1	Синий	F
435,9	"	g
434,1	"	g'
404,7	Фиолетовый	h

В оптической литературе принято обозначать величину показателя преломления буквой n , если нет специального на то указания, для желтого луча D (589,3). Когда считают необходимым дать n для другого луча, то к букве n добавляют буквенное обозначение цвета по Фраунгоферу; так n_g надо отнести к синему лучу с длиной 434,1 μ .

Разность показателей преломления для крайних линий спектра A' (красная) и h (фиолетовая) называется **полной дисперсией**; разность показателей для линий F и C называется **средней дисперсией**; разность же показателей для любой пары иных линий спектра носит название **частной дисперсии**.

Предположим, что в представленной на рис. 10 призме показатели преломления для $n_c = 1,51385$, $n_d = 1,51633$ и $n_g = 1,52623$. Тогда частная дисперсия между n_g — n_c будет равна 0,01238.

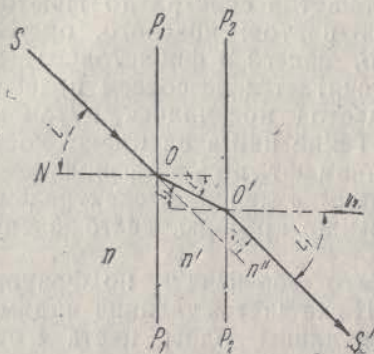


Рис. 9.

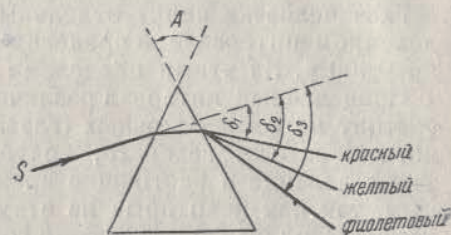


Рис. 10.

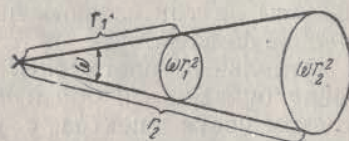


Рис. 11.

6. Световой поток, освещенность, яркость и сила света

Чтобы дать некоторое объяснение действию фотографического объектива на фотоэмульсию, недостаточно знать только геометрический ход световых лучей, а необходимо как-то количественно оценить лучистую энергию, проходящую через объектив.

Пусть где-нибудь на пути движения лучистой энергии будет помещен фотографический аппарат, у которого на место фотопластинки установлен черный экран, поглощающий всю падающую на него лучистую энергию и преобразующий ее в тепловую. Если мы теперь откроем объектив, то можно будет определить количество лучистой энергии, падающей на черный экран за какой-нибудь отрезок времени и выраженный в калориях или джоулях. Диафрагмируя наш объектив, убедимся, что, чем больше будет диафрагма, тем большее количество лучистой энергии будет падать на экран и тем большее количество калорий мы получим.

Количество лучистой энергии, проходящей через всю рассматриваемую площадь в 1 сек., называется световым потоком и обозначается F .

За единицу светового потока принимается люмен L . Люмен — световой поток, испускаемый с постоянной во всех направлениях силой света в одну международную свечу внутри телесного угла.

Обратимся теперь к освещенности поверхности. Интерес пред-

ставляет тот световой поток, который падает на данную поверхность и ее освещает.

Проведем две концентрических шаровых поверхности (рис. 11) с радиусами r_1 и r_2 из центра точечного источника света; тогда телесный угол ω вырежет из них площади ωr_1^2 и ωr_2^2 .

В случае светового потока F внутри телесного угла ω освещенность обеих площадей будет соответствовать:

$$E_1 = \frac{F}{\omega r_1^2} \text{ и } E_2 = \frac{F}{\omega r_2^2}. \quad (10)$$

Деля два равенства, найдем:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}. \quad (11)$$

На основании изложенного находим, что освещенность двух поверхностей, перпендикулярных к световым лучам, исходящим из светящейся точки, обратно пропорциональна квадратам расстояний этих поверхностей от источника света.

Под интенсивностью (яркостью) света понимается не действительное непосредственное освещение световым пучком какой-либо поверхности, а способность данного пучка произвести освещенность при действии на поверхность, приспособленную надлежащим образом.

Разумеется, как освещенность E , так и интенсивность света есть световой поток F , падающий на единицу площади.

Всякое физическое измерение силы света основано на законе освещения небольшой раздельной площадки двумя различными источниками света, лучи которых перпендикулярны к этой площадке. Одинаковая освещенность такой площадки получится в том случае, когда квадраты расстояний обоих источников света от освещаемой площадки будут прямо пропорциональны силам света источников.

Следовательно силу данного источника света можно измерить, поместив его на таком расстоянии, чтобы производимая им освещенность совпадала с освещенностью, производимой другим нормальным источником света, сила которого принята за единицу.

Служащие для этой цели специальные приборы называются фотометрами, а сам процесс измерения — фотометрированием.

Глава II. Элементы геометрической оптики

1. Оптическое стекло

Любой фото-кинообъектив имеет оптическую систему, состоящую из одной или нескольких линз, изготовленных из оптического стекла.

Оптическое стекло в отличие от обыкновенного зеркального или оконного стекла должно обладать полнейшей однородностью, т. е. иметь одинаковые физические свойства по всем направлениям. Изготовление оптического стекла является одной из труднейших задач и составляет особую отрасль стекольной промышленности. Оптические стекла производятся на специальных заводах.

В зависимости от химического состава (в основном шихта состоит из SiO_2 , ZnO , Mn_2O , BaO и пр.) оптические стекла разбиваются на две главные группы: кроны (кронглас) — стекла с показателем преломления от 1,45 до 1,60 и флинты (флинтглас) — с показателем преломления выше 1,60.

Так как при расчете фотообъективов необходим предварительный подбор оптических стекол с разными показателями преломления и дисперсией, то для удовлетворения этой потребности стекловаренные заводы выпускают очень большое количество отдельных сортов оптического стекла с разнообразными показателями преломления и дисперсией. В среднем для изготовления фотографических объективов необходимо около 20 — 25 разных сортов оптического стекла.

В каталогах союзных заводов оптического стекла (Лензос и Изос)¹ мы находим до 45 сортов оптического стекла, вырабатываемого для изготовления любых оптических приборов.

Сырое оптическое стекло подается на обрабатывающие заводы или в больших кусках, которые необходимо разрезать на отдельные единичные заготовки, или в единичных заготовках, уже отпрессованных по диаметру и толщине.

Прежде чем сырое оптическое стекло, предназначенное для фотообъективов, передается в цех для обработки, оно подвергается тщательному контролю в отношении соответствия показателя преломления данному сорту стекла, наличия свилей, пузырей, натяжения, а также его химической стойкости.

¹ Лензос — Ленинградский завод оптического стекла, Изос — Изюмский завод оптического стекла.

Необходимость постоянства показателя преломления в одном и том же сорте стекла — очевидна.

Мы уже рассматривали простейший случай преломления луча и убедились, что его направление после преломления зависит кроме угла падения также и от показателя преломления среды, в которой луч преломляется:

$$n \sin i = n' \sin i'.$$

Следовательно отступление показателя преломления от номинала, по которому был произведен расчет фотообъектива, свыше определенного допуска невозможно.

Разберем действие других пороков в сыром оптическом стекле, влияющих в той или иной степени на качество фотообъективов.

Как бы хорошо стекло во время варки ни перемешивалось, все же вследствие некоторой изолированности отдельных компонентов шихты создаются условия для образования небольшого количества стекла, отличного по своим физическим свойствам от общей массы.

Такой участок стекла вовлекается во время перемешивания в общую массу горшка и создает нитевидные полосы, называемые оптическими свилями.

Основным недостатком свили является то, что она имеет иной показатель преломления, нежели вся окружающая ее среда стекла, вследствие чего прямолинейное распространение луча в таком куске стекла нарушается. Поэтому на производстве необходим очень жесткий контроль по отбору сырых кусков оптического стекла, имеющих свилю. Ниже, в главе „Испытания фотообъективов“, мы укажем методы исследования фотообъективов на свилю и их классификацию.

Пузыри, находящиеся в линзах фотообъективов, не ухудшают качества последних. Единственным недостатком пузырей является их способность отражать падающие на них лучи, что, хотя и в незначительной степени, уменьшает количество лучистой энергии, проходящей через объектив.

На рис. 12 показан ход лучей через линзу, имеющую пузырь А. Пучок лучей S_1 свободно проходит через линзу; лучи же, ограниченные пучком S_2 , дойдя до пузыря А, частично отражаются от его первой поверхности, частично ее проходят и отражаются от второй поверхности пузыря. Таким образом через пузырь в направлении луча S_1 пройдет крайне малый процент лучей пучка S_2 . Чем больше будет пузырей, тем меньше лучей пройдет через стекло.

Весьма существенным пороком в оптическом стекле следует считать внутреннее натяжение, происходящее от быстрого и неравномерного охлаждения горшка с жидким стеклом.

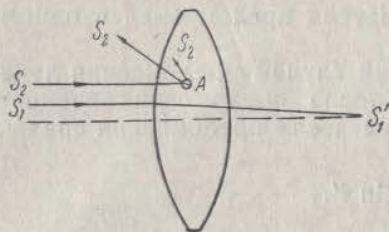


Рис. 12.

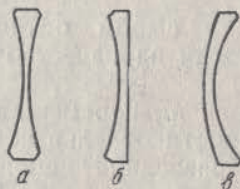


Рис. 14.

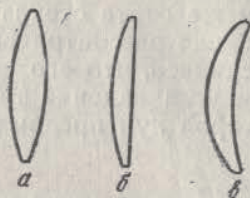


Рис. 13.

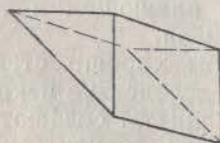


Рис. 15.

Натяжение в стекле говорит о том, что масса не однородна, что имеются участки с разной плотностью, т. е. с разными значениями показателя преломления. Фотографический объектив, изготовленный из стекла, имеющего внутреннее напряжение, вследствие двупреломляемости такого стекла, будет весьма несовершенным.

Характер и метод испытания на натяжение готовых фотообъективов указаны ниже.

Нам остается сказать несколько слов о химической стойкости оптического стекла. Стекло, несмотря на свою кажущуюся устойчивость, весьма способно поглощать водяные пары, а также и угольную кислоту из воздуха. Эта способность к поглощению настолько велика, что ле-Шателье приходит к заключению о возможности не только химического соединения водяного пара с веществом стекла, но и значительного диффундирования. Первым продуктом разложения стекла является выделение гидратов щелочей и свободной аморфной кремнекислоты, сообщающей поверхности стекла помутнение. Обыкновенная пыль, пятна от рук способствуют скоплению влаги на поверхности стекла и ускоряют процесс разложения; поэтому линзы фотообъектива следует от этого оберегать.

Все оптические стекла в отношении химической стойкости разбиты на 5 классов; стекла 1-го и 2-го классов считаются наиболее устойчивыми против разрушения и чаще всего употребляются в фотографических объективах.

2. Линзы и призмы

Фотографический объектив в зависимости от его конструкции состоит из определенного набора сферических линз. Оптическими линзами, или стеклами, принято называть прозрачные тела с двумя преломляющими поверхностями.

Линзы по их рефракции разделяют на два основных класса — положительные и отрицательные. На рис. 13 приведены в разрезе различные формы положительных линз, а на рис. 14 — отрицательных.

Положительная линза *a* имеет обе поверхности выпуклые и называется двояковыпуклой. Отрицательная линза *a* имеет обе поверхности вогнутые и называется двояковогнутой. Положительная линза *б* и отрицательная *б* называются: первая — плоско-выпуклой, вторая — плоско-вогнутой, и наконец линзы *в* называются выпукловогнутыми (как положительная, так и отрицательная).

Как это нетрудно заметить, положительные линзы отличаются от отрицательных тем, что первые на оси имеют большую толщину, чем на краях; у отрицательных линз края значительно толще, нежели середина.

Оптическая призма (рис. 15) представляет собой прозрачное тело, ограниченное двумя плоскостями, образующими между собой некоторый угол.

Переходя к изложению свойства призм, заметим, что законы, ранее выведенные для плоских зеркал, действительны и для оптических призм, поскольку отражающие грани призм играют роль зеркала.

Основное назначение призм заключается в изменении направления луча в сторону и в повороте (обращении) изображения. Указанные задачи могли быть легко выполнены при помощи зеркал, но применение призм гораздо выгоднее ввиду того, что оптическая призма лучше сохраняет свою форму, удобнее монтируется в приборе, нежели несколько зеркал, и, — самое главное, — дает возможность полного использования света, так как по закону полного внутреннего отражения в призмах не происходит потери яркости лучей, тогда как серебряный слой зеркала отражает не более 94% света.

В фотографической оптике употребляются всего два вида оптических призм, к рассмотрению которых мы и перейдем.

1. Прямоугольная призма применяется вместо плоского зеркала; назначение таких призм — изменение хода луча, превращение его из горизонтального в вертикальный и наоборот. Чаще всего эти призмы употребляются при киносъемке макетов, расположенных горизонтально, так как и оптическая ось кино-



Рис. 16.

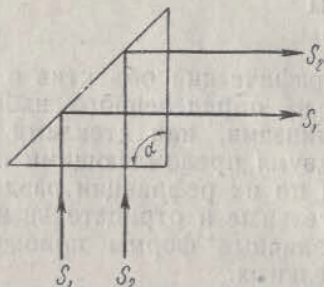


Рис. 17.

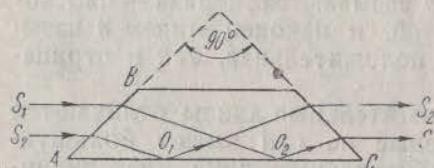


Рис. 18.

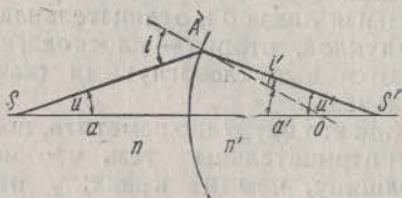


Рис. 19.

аппарата находится также в горизонтальной плоскости (рис. 16)

На рис. 17 изображен ход лучей в призме, служащей для изменения направления лучей.

Сечение призмы представляет собой половину правильного квадрата, разрезанного по диагонали. Направление лучей S_1 и S_2 перпендикулярно к нижней и боковой граням, вследствие чего лучи проходят в призму без преломления. Так как угол α равен 90° , то отражение от гипотенузы призмы лучей S_1 и S_2 последует под углом в 45° ; тем самым вертикальное направление их будет выравнено в горизонтальное.

2. Поворачивающая призма Довэ, предназначенная для поворота изображений, употребляется довольно редко при съемке, но зато часто применяется в специальной насадке на объектив для наводки на матовое стекло. Как известно, фотографический объектив дает перевернутое, так называемое обратное изображение: в некоторых случаях при таком положении изображения чрезвычайно трудно навести на резкость плоскость матовой пластинки, в силу чего и надевают на объектив призму.

На грань AB прямоугольной призмы (рис. 18) падает пучок параллельных основанию AC лучей S_1 и S_2 . После преломления и отражения от AC лучи выходят из призмы опять-таки параллельным пучком, причем верхний луч S_1 переходит вниз,

а нижний S_2 — вверх, что и дает поворот изображения на 180° . В точках O_1 и O_2 происходит полное внутреннее отражение. Этим и достигается поворачивание изображения, так как в случае помещения перед объективом призмы Довэ в объектив поступает пучок параллельных лучей от предмета, уже повернутого на 180° , что дает на матовом стекле прямое зеркальное изображение предмета.

Призма Довэ по своему действию эквивалентна плоскопараллельной пластинке и не дает окрашивания.

3. Преломление света в линзах и призмах

Рассмотрим сначала случай преломления луча через одну сферическую поверхность. Пусть две среды с коэффициентом преломления n и n' отделены друг от друга шаровой поверхностью (рис. 19). Луч света S , падающий на шаровую поверхность слева в точке A , после преломления примет направление AS' . Горизонтальную линию SS' назовем **главной осью** сферической поверхности, A' — средней точкой преломляющей поверхности, а O — центром ее кривизны; OA будет равно r — радиусу кривизны.

Отрезки $SA' = a$ и $A'S' = a'$, а также радиус кривизны будем считать положительными, если они идут по направлению света, и отрицательными, если они идут против направления света. Следовательно на рис. 19 сферическая поверхность положительная, как положителен и отрезок a' ; величину же a (SA') по выведенному закону будем считать отрицательной.

Углы будем считать положительными, если они образованы вращением оптической оси до необходимого направления по часовой стрелке. Вращение против часовой стрелки дает отрицательные углы.

По равенству (7), выведенному выше, имеем:

$$n \sin i = n' \sin i'.$$

Допустив малое значение углов i и i' и заменив синусы углами, будем иметь:

$$ni = n'i';$$

так как в нашем случае $n = \text{воздуху} = 1$, то

$$i = n'i'.$$

Приняв во внимание величины наших отрезков a и a' , путем преобразования найдем равенство для нулевых лучей:

$$arn' + a'an = aa'n' + a'rn, \quad (12)$$

откуда получим основное уравнение, разделив обе части равенства на $aa'r$, для одной преломляющей сферической поверхности:

$$\frac{n'}{a'} + \frac{n}{a} = \frac{n' - n}{r}. \quad (13)$$

Это уравнение является в оптике одним из основных соотношений геометрической оптики. Оно связывает отрезки a и a' и не зависит от углов u и u' .

Вследствие изложенного все лучи, выходящие из точки S и удовлетворяющие вышеуказанному ограничению, соберутся в точке S' .

Таким образом S' есть действительное изображение точки S . Следовательно формула (13) связывает расстояние объекта S до преломляющей поверхности с расстоянием a' до изображения объекта в точке S' от той же поверхности в зависимости от n , n' и r .

Так как в нашем случае первой средой является воздух, то $n = 1$, и уравнение (13) принимает вид:

$$\frac{n'}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{n' - 1}{r}.$$

Перейдем к рассмотрению преломления луча через две сферические поверхности.

На рис. 20 представлена линза с двумя сферическими поверхностями r_1 и r_2 . Главной осью линзы будем называть линию, соединяющую центры кривизны двух сферических поверхностей.

Допустим, что между SA_1 и A_2S' находится воздух и коэффициент преломления линзы будет n .

Лучи, вышедшие из точки S , преломившись через первую сферическую поверхность, должны были бы собраться в точке S_1 , если бы не было второй сферической поверхности. В таком случае, пользуясь уравнением (13), мы бы имели для первой поверхности:

$$\frac{n}{A_1S_1} + \frac{1}{SA_1} = \frac{n - 1}{r}. \quad (14)$$

Так как на пути хода луча A_1S_1 мы встретим вторую сферическую поверхность с r_2 , то для второй поверхности уравнение (13) примет следующий вид:

$$\frac{1}{A_1S'} + \frac{n}{A_2S_1} = \frac{1 - n}{r}. \quad (15)$$

где A_1S_1 является расстоянием мнимой светящейся точки для второй поверхности. Допустив толщину стекла A_1A_2 весьма малой, обозначим расстояния $SA_1 = a$ и $A_2S' = a'$; сложив оба равенства (14) и (15), получаем:

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (16)$$

Следует иметь в виду, что в нашем примере двояковыпуклой линзы r_2 имеет отрицательное значение, так как центр кривизны второй сферической поверхности лежит влево от линзы.

Рассмотрим теперь преломление луча через призму. В разделе о дисперсии мы указали основное значение преломления света при прохождении через призму в зависимости от преломляющего угла призмы.

Луч S , попадая на первую поверхность призмы (рис. 21), преломляясь, выходит из призмы в направлении S' . Условимся, что α — преломляющий угол призмы, i_1 и i_1' — углы падения и преломления у первой поверхности и i_2 и i_2' — углы преломления у второй поверхности.

Угол δ между падающим лучом и лучом преломления будем называть углом отклонения призмы. Показатель преломления призмы будет n .

По закону преломления получим:

$$\sin i_1 = n \sin i_1'$$

и

$$n \sin i_2 = \sin i_2'.$$

Принимая во внимание знаки углов, определим величину α и δ .

$$i_1' - i_2 = \alpha;$$

$$i_1 - i_2 - \alpha = \delta. \quad (17)$$

Подставляя (16) в вышеприведенное равенство, получим:

$$\begin{aligned} \sin i_2' &= n \sin i_2 = n \sin(i_1' - \alpha) = n (\sin i_1' \cos \alpha - \cos i_1' \sin \alpha) = \\ &= \sin i_1 \cos \alpha - \sin \alpha \sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}. \end{aligned} \quad (18)$$

Формулу (18) следует рассматривать как наиболее общую для преломления света в призме. Она дает угол выходящего луча с нормалью ко второй поверхности в зависимости от трех величин: показателя преломления призмы n , угла падения i_1 и преломляющего угла призмы α .

По значению δ и α , как это видно из предыдущего, возможно определение коэффициента преломления измерением наименьшего отклонения в призме. Угол δ в этом случае называется углом наименьшего отклонения, и формулы (17) и (18) значительно упрощаются.

Если

$$i_1 = -i_2',$$

то

$$i_1' = -i_2;$$

тогда

$$\delta = 2i_1 - 2i_1' = 2(i_1 - i_1'),$$

$$\alpha = 2i_1',$$

$$i_1' = \frac{\alpha}{2}.$$

Следовательно:

$$i_1 = \frac{\delta + 2i_1'}{2} = \frac{\delta + \alpha}{2}$$

и окончательно для определения показателя преломления призмы получаем:

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \alpha}{2}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (19)$$

Примеры

1. Определить показатель преломления призмы, у которой $\alpha = 24^\circ 12'$ и $\delta = 12^\circ 48'$.

По формуле (19) имеем:

$$n = \frac{\sin \frac{12^\circ 48' + 24^\circ 12'}{2}}{\sin \frac{24^\circ 12'}{2}} = \frac{\sin 18^\circ 30'}{\sin 12^\circ 06'} = 1,5134.$$

2. Определить угол наименьшего отклонения δ в призме с углом $\alpha = 38^\circ 17'$ и $n = 1,6428$.

3. Определить расстояние a' в случае преломления луча через сферическую поверхность с $r = 25$ мм, $n = 1,532$ от точки, находящейся на расстоянии $a = \infty$.

Так как источник света отнесен в бесконечность и $a = 0$, то

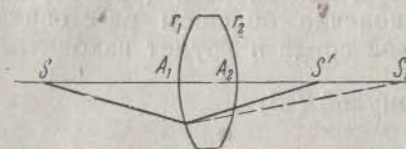


Рис. 20.

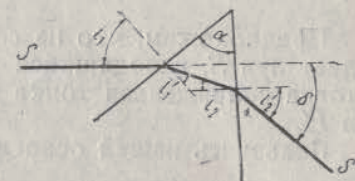


Рис. 21.

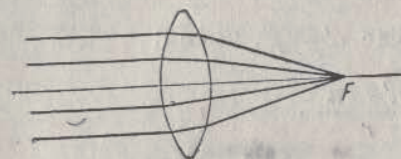


Рис. 22.

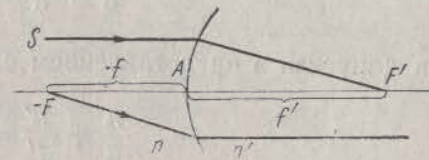


Рис. 23.

по удалении из формулы (13) в первой части равенства значения $\frac{n}{a}$, окончательный вид формулы (13) будет следующий:

$$\frac{n}{a'} = \frac{n-1}{r},$$

откуда

$$a' = \frac{nr}{n-1} = \frac{1,532 \cdot 25}{0,532} = 57,18.$$

4. Фокусные расстояния

В предыдущем разделе мы вывели основную формулу (13), связывающую расстояние от объекта до преломляющей поверхности с расстоянием до его изображения от той же поверхности в зависимости от трех величин n , n' и r . Если мы имеем две среды — воздух и стекло, с различными показателями преломления, то формула (13) показывает, что каждой точке одной среды соответствует ее изображение в другой среде. Точки эти S и S' называются сопряженными точками.

Наши рассуждения имели в виду положение точки S — объекта, на каком-то конечном от линзы расстоянии. В случае же, когда на линзу падают лучи, параллельные оси линзы, т. е. когда точка S находится в бесконечности (рис. 22), — точка F , в которой эти лучи соберутся после преломления, будет называться фокусом линзы или фокальной точкой.

a' и F будут равны только в том случае, когда точка объекта S находится в бесконечности.

Предположим, что на сферическую поверхность (рис. 23) падает луч S , находящийся на бесконечно большом расстоянии, тогда сопряженная точка во второй среде n' будет находиться в F' .

Пользуясь нашей основной формулой (13)

$$\frac{n}{a} + \frac{n'}{a'} = \frac{n' - n}{r}$$

и допуская в представленном случае $a' = f'$, имеем:

$$\frac{n}{a} + \frac{n'}{f'} = \frac{n' - n}{r}.$$

Так как a в нашем примере равно бесконечности, то формула (13) примет вид:

$$\frac{n'}{f'} = \frac{n' - n}{r},$$

откуда:

$$f' = \frac{n'r}{n' - n}.$$

Расстояние $AF' = f'$ называется задним фокусным расстоянием; оно положительно, ибо отсчитывается по направлению светового луча от поверхности до F' .

Поместив в точке F (рис. 23) светящийся объект так, чтобы после преломления лучи были параллельными оптической оси, изображение объекта получим в бесконечности.

Точка F называется передним фокусом преломляющей поверхности; она отрицательна, так как отсчитывается против направления света.

Расстояние $A-F = -f$ определим из формулы (13), сделав замену a на $-f$; так как n для передней части поверхности равно 1 (воздух), то

$$-f = \frac{r}{n - 1}.$$

Итак каждая преломляющая сферическая поверхность, разделенная разными по плотности средами, имеет два фокусных расстояния — переднее f и заднее f' . Переднее и заднее фокусные расстояния связаны отношением

$$\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}. \quad (20)$$

Следовательно абсолютные величины фокусных расстояний преломляющей сферической поверхности относятся, как показатели преломления сред, разграниченных этой поверхностью.

Остановимся немного на фокусном расстоянии системы. Наиболее простой оптической системой является линза, т. е. среда, разделенная двумя сферическими поверхностями.

Допустим, что представленная на рис. 24 линза окружена воздухом. Пучок света S от бесконечно удаленной точки после преломления через линзу дает изображение точки в заднем главном фокусе линзы F' . Если с левой стороны линзы на оси системы поместим точку в $-F$ так, чтобы после преломления в линзе лучи были строго параллельны оптической оси, то точка $-F$ будет передним главным фокусом линзы.

По ранее выведенному правилу расстояние f' будет положительным, а $-f$ — отрицательным.

Продолжая луч $F'A_2$ до пересечения с лучом SS , получим точку H_2 , лежащую в задней главной плоскости линзы. Продолжая луч $-FA_1$ до пересечения с лучом SS , получим точку H_1 , лежащую в передней главной плоскости.

Опустив из точек H_1 и H_2 перпендикуляр на оптическую ось линзы, получим точки H_1' и H_2' , называемые главными точками линзы.

Перпендикуляры H_1H_1' и H_2H_2' называются главными плоскостями — передней и задней.

По отношению к главным плоскостям применим следующие законы:

1. Луч, падающий на переднюю главную плоскость на высоте h , выйдет из задней главной плоскости на той же самой высоте h .

2. Линейное увеличение в главных плоскостях равно $+1$.

Таким образом заднее главное фокусное расстояние оптической системы f' есть расстояние изображения лежащей на оси бесконечно удаленной точки, отсчитываемое от задней главной плоскости. Аналогично переднее фокусное расстояние $-f$ есть расстояние переднего фокуса системы от передней главной плоскости.

Когда первая среда и последняя одинаковы (обладают одинаковыми показателями преломления), — главные фокусные расстояния равны между собой, т. е. $-f = f'$.

Сравнивая формулу (16) с общей формулой

$$\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_0}, \quad (21)$$

мы получаем для главного фокусного расстояния F' выражение:

$$\frac{1}{f_0'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right). \quad (22)$$

Уравнения (21) и (22) в конечном итоге дают:

$$f_0' = -f_0 = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_1 + r_2)}. \quad (23)$$

Формула (23) действительна для любой линзы, если только мы пренебрегаем временно толщиной ее.

Из этой формулы (23) видно, что $f' = -f$, т. е. что фокусные расстояния равны, но противоположны по знаку. Если заднее главное фокусное расстояние системы положительно, то и данная оптическая система называется положительной или собирательной; если же заднее фокусное расстояние системы отрицательно, то система называется отрицательной или рассеивающей.

Формула (23) выведена без учета толщины линзы; если мы обозначим через d толщину линзы в центре, то эта формула примет следующий вид:

$$f' = -f = \frac{r_1 r_2}{(n-1) \left(r_1 + r_2 - \frac{n-1}{n} d \right)}. \quad (24)$$

Фото-кино объектив обычно состоит из нескольких линз, находящихся на оптической оси; найти так называемое эквивалентное фокусное расстояние фотообъектива на основании предыдущих рассуждений и приведенных формул не представляет большого труда.

Допустим, что на оптической оси находятся две центрированных оптических системы (рис. 25) Фокусы этих систем обозначим через $-f_1, f_1', -f_2$ и f_2' , а главные плоскости — через H_1, H_1', H_2 и H_2' . Назовем расстояние между задним главным фокусным расстоянием первой системы f_1' и передним фокусом $-f_2$ второй системы их оптическим интервалом и обозначим его через Δ , так что

$$\Delta = f_1' + f_2.$$

Определив из формулы (24) величины f_1' и $-f_2$ и приняв формулу (21), находим эквивалентное фокусное расстояние оптической системы через

$$f_0' = \frac{f_1' - f_2}{\Delta} \quad (25)$$

По формуле (25) можно найти эквивалентное фокусное расстояние объектива или иной оптической системы при любом количестве линз. Для этого следует комбинировать отдельные системы по две последовательно и находить общий эквивалентный фокус системы.

Если оптический интервал $\Delta = 0$, то система называется телескопической и изображение предмета будет в бесконечности.

Примеры.

1. Определить $-f$ и f' одной сферической поверхности со следующими данными: $r = +18$; $n = 1,67$.

Для f' имеем формулу:

$$f' = \frac{nr}{n-1} = \frac{1,67 \cdot 18}{0,67} = 44,86.$$

Переднее фокусное расстояние определяем по формуле:

$$-f = \frac{r}{n-1} = \frac{18}{0,67} = -26,86.$$

Итак заднее фокусное расстояние линзы равно 44,86, а переднее — 26,86.

2. Пользуясь основной формулой (13), применим ее для подсчета луча через несколько сферических поверхностей.

Требуется найти f' для двояковыпуклой линзы, имеющей следующие данные:

$$\begin{aligned} r_1 &= +28,0; \\ r_2 &= -14,0; \\ d (\text{толщина}) &= 5,0; \\ n &= 1,56. \end{aligned}$$

На рис. 26 изображена схема хода луча S через заданную двояковыпуклую линзу. Для удобства графического изображения a_1 как мнимой светящейся точки для второй сферической поверхности линзы ход лучей после преломления через первую поверхность показан условно.

Выведем основные уравнения для первой и второй сферических поверхностей.

Допустив, что линза окружена воздухом с $n=1$, для первой поверхности будем иметь следующее уравнение:

$$\frac{1}{a} + \frac{n}{a'} = \frac{n-1}{r_1}. \quad (26)$$

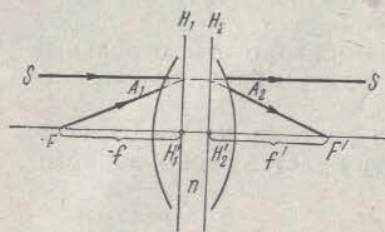


Рис. 24.

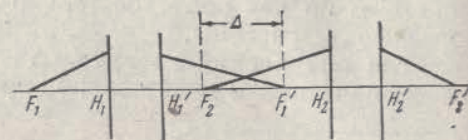


Рис. 25.

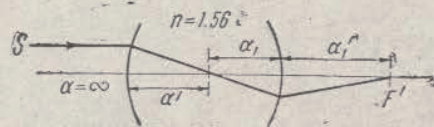


Рис. 26.

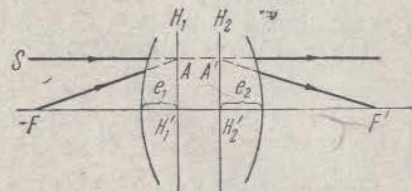


Рис. 27.

Уравнение для второй поверхности примет вид:

$$\frac{n}{a_1} + \frac{1}{a_1'} = \frac{1-n}{r_2} \quad (27)$$

Из рис. 26 следует найти три неизвестных: a' , a_1 и a_1' , причем a' находим из уравнения (26) и a_1' — из уравнения (27); a_1 определяем из величины $a' - d$; таким образом выпишем формулы для a , a' , a_1 и a_1' :

$$\begin{aligned} a &= \infty, \\ a' &= \frac{nr}{n-1}, \\ a_1 &= a' - d, \\ a_1' &= \frac{a_1 r_2}{r_2 n + a(n-1)}. \end{aligned} \quad (28)$$

В нашем случае a_1' определяет расстояние до главного фокуса F' от вершины второй сферической поверхности. Такое расстояние называется **задним вершинным фокусным расстоянием** и конечно отличается от главного заднего фокусного расстояния f' , отсчитываемого, как мы знаем, от главной задней

плоскости. Для того чтобы получить величину заднего главного фокусного расстояния f' , следует

$$\frac{a' a_1'}{a_1} = f'.$$

Подставив в приведенные для расчета формулы числовые значения элементов линзы, найдем искомое f' равным 17,4 мм.

5. Определение главных точек и главных плоскостей

В предыдущем разделе мы упомянули о построении главных плоскостей и главных точек. Понятие о главных плоскостях оптической системы, введенное Гауссом, имеет большое значение для графического обозначения хода лучей.

Если параллельный оси луч S (рис. 27) встретит переднюю главную плоскость $H_1 H_1'$ в точке A , то он покинет систему в сопряженной точке A' задней главной плоскости $H_2 H_2'$, затем пройдет точку F' на оси системы.

При этом нам нет надобности проследивать ход лучей между передней и задней главными плоскостями. Ранее было указано, что лучи, пересекающие переднюю главную плоскость на высоте h , на той же самой высоте выйдут из задней главной плоскости.

На рис. 27 расстояние от передней вершины линзы до передней главной плоскости обозначено через l_1 , расстояние же от задней главной плоскости — через l_2 . Пользуясь равенством (13) и формулой 24, имеем:

$$l_1 = \frac{r_1 d}{n(r_1 + r_2) - (n-1)d}; \quad (29)$$

$$l_2 = \frac{r_2 d}{n(r_1 + r_2) - (n-1)d}; \quad (30)$$

где d означает толщину линзы в центре.

Как это нетрудно заметить

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (31)$$

На рис. 28 и 29 показано положение главных плоскостей H_1 и H_2 , а также главных точек H_1' и H_2' в наиболее распространенных типах линз, применяемых в фотографическом объективе.

Так как главные фокусные расстояния отсчитываются от главных плоскостей, то обозначение фокусного расстояния от вер-

шины оптической системы дает вершинное фокусное расстояние, равное $f' - l_2$ или $-f - l_1$.

Задача. Определить положение главных плоскостей у двояковыпуклой линзы, имеющей одинаковые радиусы кривизны ($r_1 = r_2$).

6. Построение изображений

Ознакомившись с положением главных точек, главных плоскостей и главных фокусов, можно уже вывести правило построения изображений,

Проведем из точки P (рис. 30) луч PH_1 параллельно оптической оси SS' . Из точки H_2 этот луч в пространстве изображения пересечет F' и пойдет по направлению $F'P'$.

Из той же точки P проводим другой луч $P-F$ через передний фокус системы. На основании предыдущего из точки H_2' этот луч пойдет параллельно оси. Таким образом точка P' является изображением точки P , а плоскость $S'P'$ — изображением плоскости PS . Точки PP' и плоскости PS и $S'P'$ называются сопряженными точками и плоскостями.

На рис. 30 расстояние предмета от $-F$ обозначено буквою x и расстояние изображения $F'S'$ обозначено через x' .

В данном случае отрезок x имеет отрицательный знак, а отрезок x' положителен.

На основании подобия треугольников $PS-F$ и $-FH_1'H_1''$ и допустив $PS = y$, получим:

$$\frac{y}{y'} = \frac{-x}{-f}. \quad (32)$$

Из треугольников $H_2H_2'F'$ и $F'S'P'$, допустив величину отрезка $S'P'$ равной y' , находим:

$$\frac{y}{y'} = \frac{f'}{x'}. \quad (33)$$

Сравнивая выражения (32) и (33), получим основное уравнение Ньютона, чрезвычайно удобное для быстрых предварительных расчетов положения и величины изображения:

$$xx' = ff' \quad (34)$$

При построении изображения мы одновременно можем выве-

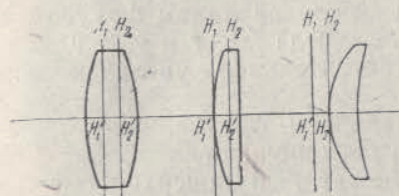


Рис. 28.

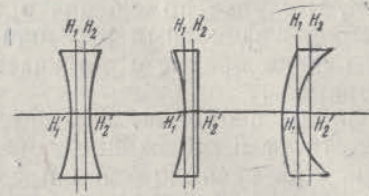


Рис. 29.

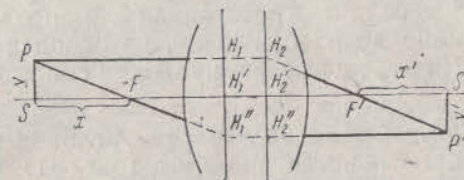


Рис. 30.

сти и формулу линейного или поперечного увеличения сопряженных плоскостей y и y' в виде

$$V = \frac{y'}{y}, \quad (35)$$

где V и будет линейным или поперечным увеличением. Согласно равенствам (32), (33) и (34) линейное увеличение можно выразить при участии выведенных переменных x и x' следующим образом:

$$V = \frac{y'}{y} = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f'}. \quad (36)$$

Увеличение V — величина постоянная для одной какой-либо пары сопряженных плоскостей, перпендикулярных оптической оси.

Некоторые свойства сопряженных точек:

1. Большему x всегда соответствует меньшее x' .
2. Объект и его изображение двигаются всегда в одном направлении.
3. Если $x > f$, то $y' < y$, т. е. изображение получится меньше объекта; если объект приближается к f , величина изображения увеличивается; при $x = f$ изображение равно объекту: $y' = y$.

4. В случае помещения предмета между передним фокусом и двойным фокусным расстоянием, т. е. когда $x < f$ и $y' > y$, изображение предмета получается действительное, увеличенное и обратное.

5. Когда предмет находится в переднем фокусе, ему соответствует изображение, лежащее в бесконечности.

6. При расположении предмета между f и поверхностью системы изображение получаем прямое, мнимое и увеличенное.

Задача. Обозначив через f' заднее фокусное расстояние объектива, через a — расстояние до предмета и через a' — расстояние до изображения, на основании формул (13) и (21) вывести отдельные формулы для сопряженных точек S и S' .

Разберем еще два случая увеличения — угловое и продольное. Обозначим в пространстве предмета (рис. 31) через U угол, составленный лучом SA с осью, а через U' — угол, составленный сопряженным лучом $A'S'$ и осью в пространстве изображения.

Отношение

$$\frac{\operatorname{tg} U'}{\operatorname{tg} U} = K \quad (37)$$

и называется **угловым увеличением в сопряженных плоскостях перпендикулярных оси**. Угловое увеличение K для данной пары сопряженных плоскостей сохраняет постоянную величину при разных значениях углов U и U' .

Если несколько сместить (рис. 31) точку предмета S вдоль оси на отрезок Δx в точку S_0 , то сопряженное изображение точки S' также несколько сместится и передвинется на величину $\Delta x'$.

Отношение осевого смещения точек изображения к осевому смещению сопряженной точки предмета называется **продольным увеличением** и обозначается буквой m .

Дифференцируя уравнение Ньютона (34), получим:

$$x \cdot \Delta x' + x' \cdot \Delta x = 0 \quad (38)$$

Из формулы (35) следует, что продольное увеличение

$$m = \frac{\Delta x'}{\Delta x} = - \frac{x'}{x} \quad (39)$$

Если система находится в воздухе, т. е. когда $-f = f'$, выражение для продольного увеличения упрощается:

$$m = \frac{f^2}{x^2}$$

Сравнивая последнее выражение с формулой линейного увеличения, находим, что **продольное увеличение равно квадрату линейного увеличения**.

Последнее обстоятельство служит некоторым предостережением при съемке фотообъективом трехмерного предмета в большом масштабе. Так как при отображении такого предмета его размеры по оси увеличатся или уменьшатся значительно, нежели поперечные размеры, то непременно получится искажение.

7. Диафрагмы в фотографических объективах и их назначение

Каждая оптическая система, в том числе и фотокинообъектив, ограничена в своей возможности пропускать через себя лучи, падающие на систему или объектив под любым углом. Отдельные элементы фотообъектива — линзы — всегда имеют ограниченные размеры; кроме того для получения более резких и хороших изображений фотообъективы снабжаются добавочными преградами в виде диафрагм, плоскости которых всегда перпендикулярны к оси системы, а центр лежит на оси объектива.

Следовательно пучок лучей, входящих в объектив от какой-либо точки предмета и выходящих из него, строго ограничен размерами как самих линз объектива, так и диафрагмой. Размеры и формы таких отверстий диафрагм, разумеется, и определяют величину светового потока.

Основное назначение диафрагм: а) ограничить поле зрения объектива, б) уменьшить так называемые аберрации, т. е. недостатки объектива, и в) уничтожить вредные отражения, или, как их называют, блики.

Ограничительными диафрагмами фотографического объектива служат оправы, в которых монтированы линзы. Но не все диафрагмы объектива являются действующими ограничителями; если из центра изображаемой плоскости провести лучи к краям всех изображений диафрагм в пространстве объектов, то среди всех изображений окажется одно изображение, для которого угол между этими лучами будет наименьшим. Этот угол и определит действующую диафрагму.

На рис. 32 построены сопряженные лучи $SA, A'S'$. Из точки S пучок лучей SAH падает на диафрагму, ограниченную радиусом ρ под наименьшим углом $2U$.

Очевидно, что всякий иной луч, вышедший из точки S под углом с осью, превышающим U , не может пройти сквозь диафрагму.

Диафрагма $AH = \rho$, определяющая угол U , и будет служить действующей, или **апертурной, диафрагмой**. На рис. 32 H и

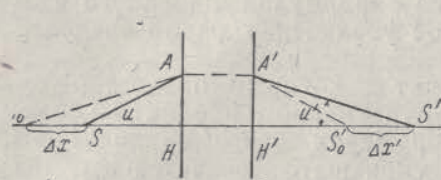


Рис. 31.

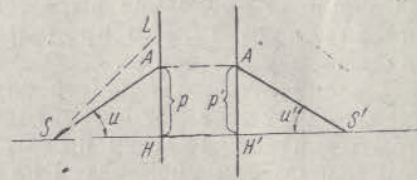


Рис. 32.

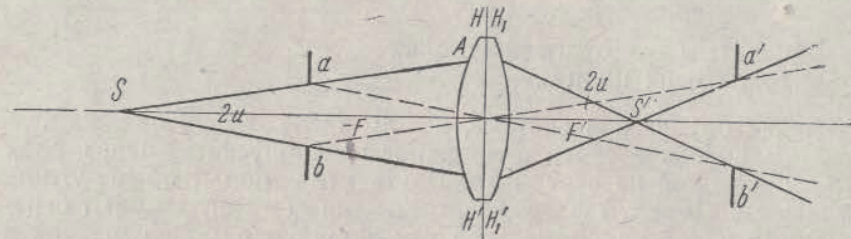


Рис. 33.

H' — главные плоскости простой линзы; угол $2U$ называется углом отверстия пучка входящих лучей, а угол $2U'$ — углом отверстия пучка выходящих лучей. Площадь отверстия диафрагмы AN будет служить входным отверстием, или входным зрачком. В нашем случае $A'H' = AN$ и называется выходным отверстием, или выходным зрачком, системы. Ясно, что выходной зрачок есть изображение входного зрачка.

Пусть между точкою S предмета (рис. 33) и линзой находится диафрагма ab на некотором расстоянии за передним главным фокусом системы. Построим через оптическую систему изображение диафрагмы $a'b'$. Отверстие диафрагмы ab определяет угол отверстия пучка входящих лучей $2U$, а потому и называется входным отверстием системы; хотя диаметр линзы значительно больше.

Диаметр $a'b'$ изображения диафрагмы определяет угол $2U'$ отверстия пучка выходящих лучей, вследствие чего изображение $a'b'$ отверстия диафрагмы называется выходным отверстием системы. В нашем случае выходное отверстие системы представляет собой нематериальную диафрагму и является лишь изображением ab .

Очевидно, что к линзе могут проникнуть от точки S только лучи, ограниченные углом $2U$; все же остальные лучи будут задержаны непрозрачной частью диафрагмы.

Разберем случай мнимого изображения входного отверстия.

На рис. 34 представлена ландшафтная линза с впереди стоящей диафрагмой.

Система имеет собственно две диафрагмы: ограничительную диафрагму ab , стоящую впереди объектива, между объективом и передним фокусом, и оправу самого объектива — AA' . Ввиду того что угловая величина диафрагмы ab меньше угловой величины диаметра AA' , диафрагма ab имеет значение входного зрачка системы.

Выходной же зрачок ландшафтного объектива получим, построив изображение диафрагмы ab в плоскости $a'b'$. Так как диафрагма расположена ближе переднего фокуса, то изображение ее будет увеличенным, мнимым и получится слева от плоскости ab .

Задача. Построить входной и выходной зрачки в симметричном фотографическом объективе типа апланат, у которого диафрагма, ограничивающая пучки лучей, расположена между первой и второй линзами апланата (рис. 35).

Первоначально следует построить изображение диафрагмы, даваемое передней линзой, после чего — изображение, даваемое задней линзой. Напомним, что входной и выходной зрачки симметричного объектива расположены в главных плоскостях объектива и что оба изображения диафрагмы ab одинаковы.

8. Система из нескольких линз

Огромное количество выпущенных до настоящего времени фото-кинообъективов, в большинстве состоящих из сферических линз, представляет собой различные комбинации набора отдельных сферических поверхностей, разделенных средой с одинаковыми показателями преломления. Та или иная комбинация набора отдельных линз, составляющая конструктивный элемент какой-либо оптической системы (в нашем случае фотообъектива), называется системой из нескольких линз.

Системы, у которых центры сферических преломляющих поверхностей расположены на одной прямой (на оптической оси), называются оптическими системами с центрированными сферическими поверхностями.

Каждая оптическая система из нескольких линз определяется следующими элементами: радиусами сферических поверхностей, их числом, воздушными промежутками, толщинами линз в центре и показателями преломления всех сред.

При разборе оптических систем нами принят нижеследующий порядок обозначений:

r — радиус кривизны сферической поверхности (цифры 1, 2, 3... и т. д., поставленные у буквы r , означают, к какой сферической поверхности данная величина относится);

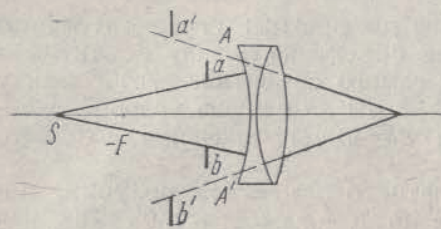


Рис. 34.

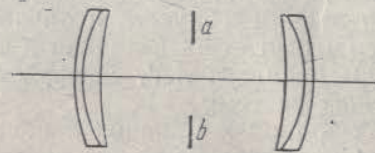


Рис. 35.

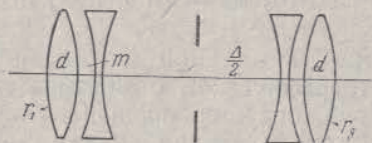


Рис. 36.

d — толщина линзы в центре;
 m — воздушные промежутки;
 n — показатель преломления;
 f — фокусные расстояния;
 h — радиус линзы ($2h$ означает диаметр линзы).
 Все эти величины даны в мм.

Обозначение оптических систем и счет отдельных элементов всегда идут слева направо.

На основании выведенных законов и формул определения фокусных расстояний, главных плоскостей и точек, построения изображения и т. д. последовательное определение F' , даваемое центрированной оптической системой, не представляет затруднений.

В виде примера приводим порядок обозначения отдельных элементов объектива (рис. 36) типа Целор-Герца:
 $f' = 240,0$ — относительное отверстие 1:10,4, поле зрения 80°

$$\begin{aligned} r_1 = r_8 &= 59,309 & d_1 = d_8 &= 4,93 & n_1 &= 1,6112 \\ r_2 = r_7 &= 130,924 & m_1 = m_2 &= 1,81 & n_2 &= 1 \\ r_3 = r_6 &= 88,944 & d_2 = d_4 &= 2,24 & n_3 &= 1,5356 \\ r_4 = r_5 &= 71,973 \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta}{2} = 6,02$$

Обозначению $\frac{\Delta}{2}$ соответствует расстояние от четвертой поверхности объектива до диафрагмы; так как в нашем примере объектив симметричен, то и расстояние от диафрагмы до пятой сферической поверхности равно 6,02.

Глава III. Элементы глазной оптики

1. Устройство глаза

Основным инструментом, определяющим качество фотографического объектива, является глаз наблюдателя. Следовательно судить о качестве фотообъектива возможно после предварительного исследования наших глаз и определения их недостатков.

Человеческий глаз — весьма несовершенный оптический инструмент; ему присущи большие недостатки; поэтому точное определение в фотообъективе резкости, разрешающей способности и качества изображения необходимо производить после того, как будут выявлены недостатки глаз.

С этой целью необходимо хотя бы элементарное ознакомление с физиологическим процессом видения при помощи глаза (т. е. с физическими свойствами глаза).

Человеческий глаз представляет собой довольно сложную оптическую систему, состоящую из целого ряда преломляющих сред, отделенных друг от друга соответствующими поверхностями.

Начальная твердая непрозрачная оболочка глаза называется склерой (рис. 37). Прозрачна она только в передней части глаза, где образует несколько выступающую вперед роговую оболочку сферической формы. За роговой оболочкой находится заполненная водянистой влагой передняя камера.

Далее следует радужная оболочка, за которой помещается хрусталик — прозрачное тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы, более плоской спереди и выпуклой сзади.

В центре радужной оболочки имеется круглое отверстие, называемое зрачком, диаметр которого может при помощи специальных мышц увеличиваться или уменьшаться, в зависимости от величины падающего в глаз светового потока лучистой энергии. Все изменения величины зрачка при любом освещении происходят в пределах от 2 до 7 мм.

Внутренность глазного яблока за хрусталиком заполнена стекловидной влагой консистенции желе.

Дно глаза выстлано особым рода сосудистой оболочкой, представляющей сложное сплетение кровеносных сосудов, питающих глаз. За ней, у склеры, находится самая главная часть зрительного аппарата — сетчатая оболочка, или сетчатка.

Сетчатка представляет собой экран, на котором посредством

оптической системы глаза воспроизводится изображение внешнего мира. Сетчатка весьма чувствительна к световому раздражению.

Оптическая система глаза состоит следовательно из роговицы, водянистой влаги (передняя камера), хрусталика и стекловидной влаги. Указанная схема глаза представляет значительную трудность и сложность расчета хода лучей.

Переднее фокусное расстояние глаза неодинаково с задним, так как проходимая светом последняя среда (стекловидная влага) обладает показателем преломления, отличным от единицы.

2. Акт зрения

Как сказано выше, оптическая система глаза дает изображение предметов на сетчатке.

Световой луч, проходя оптическую систему глаза, проникает сквозь ряд слоев (около 10) сетчатки и попадает наконец в предпоследний слой, который заключает в себе светочувствительные элементы, состоящие из палочек и колбочек.

Палочки и колбочки находятся в центрах шестигранных клеток и придают всему светочувствительному слою сетчатки вид, напоминающий пчелиные соты. Размеры палочек и колбочек очень малы, длина цилиндров палочек равна приблизительно 0,003 мм, а диаметр их—0,002 мм. Высота конуса колбочки около 0,002 мм, диаметр его—0,004 мм. Число самих палочек и колбочек весьма велико—оно доходит до 7 млн. колбочек и до 130 млн. палочек.

Каждая колбочка имеет в мозгу свою корреспондирующую клетку, с которой она соединена особым нервным волокном, принадлежащим только ей, тогда как одна мозговая клетка обслуживает около 100 палочек.

Самое лучшее и отчетливое зрительное восприятие получается в центре так называемого желтого пятна. Само желтое пятно находится несколько в стороне от оптической оси, ближе к височной части. Центральная часть этого места сетчатки играет в акте зрения особую важную роль; здесь в сетчатке уменьшаются и исчезают некоторые промежуточные слои и остаются неизменными только палочки и колбочки. Это место и служит центральной частью фиксации зрения, т. е. местом наиболее резкого и ясного зрения. Всякое отклонение изображения от центральной части желтого пятна влечет за собою уменьшение ясности и резкости изображения.

Заболевания в области желтого пятна резко уменьшают остроту нашего зрения.

Наличие в палочках особого пигмента „зрительного пурпура“ (радопсина), собирающегося в темноте и выцветающего на свету,

убеждает нас в том, что зрительное восприятие посредством палочек обусловлено химической реакцией под действием света на радопсин. В колбочках до настоящего времени не открыто никакого вещества, на которое свет оказывал бы непосредственное воздействие; поэтому предполагают, что функция колбочек отличается от функции палочек,—полагают, что колбочки приспособлены по преимуществу к дневному зрению, а палочки—к сумеречному.

Самый акт зрения по общепринятой теории Ф. Криса заключается в следующем.

Палочки являются светоощущающими элементами, главным образом при ослабленном—сумеречном освещении. Накапливающийся в них в темноте зрительный пурпур начинает разлагаться при раздражении сетчатки самым слабым источником света. Когда освещенность сетчатки слишком велика, весь зрительный пурпур в данном месте выцветает, и реакция палочек прекращается. Таким образом палочки принимают участие в зрительном восприятии предмета только при весьма малой освещенности, вследствие чего они не дают возможности различать цвета.

В противоположность палочкам колбочки приспособлены к яркому освещению. После разрушения зрительного пурпура в палочках и приостановления в них реакции светового раздражения начинают усиленно функционировать колбочки, воспринимающие отчетливо не только изображение предмета, но и его окраску (цвета).

При смене больших яркостей малыми требуется некоторое время для восстановления зрительного пурпура в палочках, после чего и начинается их деятельность. Это подтверждается всем известным фактом некоторой „слепоты“ при выходе человека из ярко освещенной комнаты в темное помещение: в первый момент глаза ничего не видят, и только по прошествии некоторого времени, когда восстановится зрительный пурпур в палочках и последние начинают функционировать, глаза воспринимают окружающие предметы, хотя и слабо освещенные.

Такое приспособление глаза к изменяющимся условиям яркости носит название адаптации.

Нормальный глаз человека должен давать на сетчатке ясные изображения предметов, находящихся на любом расстоянии в пределах от бесконечности до 250 мм (расстояние ясного зрения).

Так как расстояние между хрусталиком и сетчаткой постоянно, то необходимость компенсации для получения резких изображений от предметов, удаленных на различные дистанции, достигается изменением фокусного расстояния самой оптической системы глаза путем так называемой аккомодации глаза, заклю-

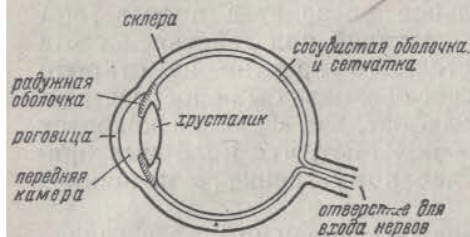


Рис. 37.

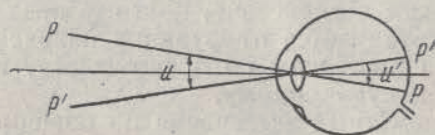


Рис. 38.

чающейся в изменении посредством мышечного аппарата кривизны передней и задней поверхностей хрусталика.

Степень аккомодации обычно обозначают в диоптриях, т. е. в величине, обратной главному фокусному расстоянию, выраженному в метрах.

У некоторых людей сетчатка глаза находится несколько дальше от хрусталика, чем у людей с нормальным зрением, и глаз не в состоянии аккомодировать эту разницу. Такое явление называется близорукостью и исправляется тем, что впереди глаза ставят отрицательную очковую линзу, которая удлиняет общее фокусное расстояние глаза.

Дальнозоркость — явление, обратное близорукости.

Причиной дальнозоркости является укорочение расстояния между хрусталиком и сетчаткой. Для устранения дальнозоркости необходимо перед глазом ставить положительную линзу.

3. Разрешающая сила глаза

Судить о резкости и качестве изображения, даваемого фотографическим объективом, возможно на основе изучения разрешающей силы глаза, т. е. того самого аппарата, который дает качественную оценку испытываемому объективу.

Под разрешающей силой глаза (острота зрения) подразумевают наименьшее угловое расстояние двух объектов — точек, при котором глаз способен еще воспринимать эти точки отдельно друг от друга.

Предположим на некотором расстоянии от глаза предмет и проведем от крайних точек его PP' две линии (рис. 38), проходящие через хрусталик и дающие обратное изображение предмета на сетчатке. Угол U равен углу U' .

Многочисленные наблюдения показали, что наименьший угол U , при котором глаз еще различает отдельно две точки, равен $1'$. Если угол меньше $1'$, то эти точки сливаются и глаз не в состоянии их различить.

Объяснение этому явлению следующее: выше мы упомянули, что изображение предмета, богатого деталями и хорошо освещенного, передается колбочками. Одну точку глаз видит только в том случае, когда ее изображение падает на одну колбочку. Если изображение второй точки попадает на соседнюю колбочку, то вследствие недостаточной избирательной способности раздражения отдельных рядом стоящих колбочек глаз может не воспринять существования двух отдельных точек. Только одновременное раздражение двух колбочек, разделенных третьей, дает впечатление двух отдельных точек.

В результате изложенного попытаемся определить тот наименьший угол, при котором будут раздражены две колбочки, разделенные третьей. Зная, что величина поперечника колбочки равна приблизительно $0,004$ мм, мы должны взять такой угол, который мог бы охватить три колбочки.

Взяв отрезки по $0,004$ мм от границ раздела одной колбочки (рис. 39), мы создадим возможность охвата углом U' двух колбочек, разделенных третьей.

Принимая величину промежутка от хрусталика до слоя колбочек равной $16,7$ мм, получаем предел разрешительной способности глаза:

$$\frac{0,0048}{16,7} = 1'.$$

Таким образом величина наименьшего угла, а следовательно наибольшей разрешительной способности глаза, определяется анатомическим строением сетчатки. Чем меньше поперечник колбочек, тем больше разрешающая сила глаза.

4. Стереоскопическое видение

В акте зрения нормально участвуют два глаза: совместное зрительное восприятие двух глаз гораздо острее, нежели восприятие одного глаза.

Самое же главное в стереоскопическом, или бинокулярном, зрении — это ощущение глубины пространства, суждение о рельефности предметов, находящихся в пространстве на разных расстояниях от наблюдателя.

То обстоятельство, что между глазами имеется некоторое, хотя и не очень большое расстояние, создает различие в изображениях предметов на сетчатке правого и левого глаза.

Проследим это на рис. 40. Пусть Γ_a и Γ_n обозначают зрачки глаз, а C_a и C_n — сетчатки. Допустим, что оба глаза фиксированы на точку P в пространстве предмета. Изображение этой точки получим на сетчатках в точках P_a P_n . Пусть одновременно глаза рассматривают и точку P' , изображение которой получит-

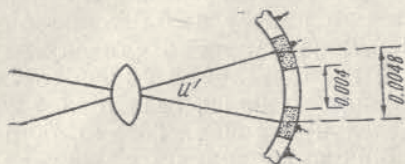


Рис. 39.

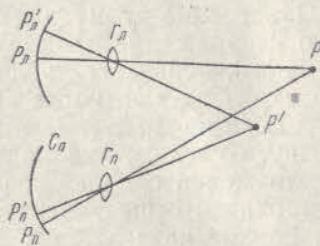


Рис. 40.

ся в точках P'_A , P'_n . Заметим, что оба отрезка $P'_A P_A$ и $P'_n P_n$ — разной длины. Соединяя оба изображения в одно общее, мозговые центры придают ему свойство стереоскопичности, которое дает суждение о взаимном удалении точек P и P' в глубине пространства.

Если бы оба отрезка $P'_A P_A$ и $P'_n P_n$ имели одинаковую длину и были расположены в одних и тех же местах сетчатки, то восприятие таких изображений дало бы нам суждение о том, что оба рассматриваемых предмета находятся на одинаковом расстоянии от глаза.

Благодаря таким свойствам зрения обоими глазами нетрудно создать стереоскопическое ощущение пространства от помещенных перед глазами двух плоских картин. Такие картины должны давать перспективное представление предмета строго из своего центра перспективы, совпадающего с центром соответствующего глаза. Центры правой и левой картин не должны превышать расстояния между зрачками глаз. Рекомендуется правую картину отделить у глаз небольшой перегородкой от левой.

Описанное явление лежит в основе стереоскопического фотографирования аппаратом с двумя фотообъективами и последующим печатанием позитива с правым и левым изображениями предмета, рассматриваемого в специальном приборе—стереоскопе.

Глава IV. Недостатки изображения объективов

1. Понятие об аберрации

Исследование и изучение фотографических объективов, состоящих из сферических линз с центрированными поверхностями, показало, что только весьма малая область пространства объектива вблизи его оптической оси дает гомоцентрический пучок лучей, т. е. такой пучок лучей, который сходится на оси в одной точке. В остальной же области пространства объектива бывают различные недостатки, причем недостатки эти увеличиваются для пучков лучей, проходящих ближе к краям объектива. Вполне совершенной оптической системы фотообъектива не существует; каждый объектив обладает теми или иными недостатками в разной конечной степени. Изучению и определению таких недостатков и посвящена эта глава.

В предыдущих наших рассуждениях все выводы и формулы были даны в предположении, что высота h входящего луча и его наклон U к оси системы бесконечно малы, и мы пользовались так называемыми нулевыми, или осевыми, лучами.

В действительности h и U обычно имеют конечные значения, и это обстоятельство объясняет тот факт, что светящаяся точка простой некоррегированной (неисправленной) системой изображается не точкой, а некоторым кружком рассеяния.

Лучи, входящие на разных высотах в объектив, дают изображение точки в различных местах оси системы; кроме того пучки, наклонные к оси, дают изображение также не в фокальной плоскости параксиальных лучей, т. е. лучей, входящих под нулевым углом на нулевой высоте.

Все такие отклонения положения и формы изображения называются аберрациями оптической системы. В основном мы имеем две группы аберраций: 1) аберрации монохроматических лучей, так называемые сферические аберрации, и 2) хроматические аберрации, т. е. отклонения, получающиеся вследствие различной преломляемости разных цветных лучей.

При расчете и конструировании фотографических объективов стараются по возможности устранить или довести до минимальной величины остаточные аберрации.

В зависимости от назначения и цели фотографического объектива, в последнем допускаются различные величины тех или иных аберраций.

2. Сферическая aberrация— продольная и поперечная

Сферическая aberrация заключается в отступлении от **гомоцентричности** выходящего из системы пучка лучей. Параллельный оси системы пучок лучей, проходя через неисправленную линзу, не собирается в фокусе системы, а дает ряд изображений светящейся точки в зависимости от высоты входа лучей в систему.

На рис. 41 приведен случай сферической aberrации простой двояковыпуклой линзы. Лучи, параллельные оси системы, проходящие на высоте h_1 , h_2 , h_3 , соберутся не в точке F' —фокальной плоскости линзы, а на некотором расстоянии от нее. Такое явление имеет место вследствие различной величины углов преломления линзы; краевые лучи h_3 преломляются сильнее, чем лучи, проходящие на высоте h_2 и h_1 , поэтому они и собираются в точке S_3 , ближе к системе, чем лучи S_2 и S_1 .

Отрезки $F'S_1$, $F'S_2$, $F'S_3$ называются продольной сферической aberrацией. Обозначим эту aberrацию через

$$\left. \begin{aligned} \delta f'_1 &= S_1 - F' \\ \delta f'_2 &= S_2 - F' \\ \delta f'_3 &= S_3 - F' \end{aligned} \right\} (40)$$

Проведя к пучку лучей, выходящих из линзы, касательную AS_1 , мы получим поверхность, называемую **каустической поверхностью**.

В случае, когда разность $S_1 - F'$ будет отрицательна, как это имеет место в приведенном примере двояковыпуклой линзы, оптическая система называется **недокорректированной**, или **недоисправленной** в отношении сферической aberrации: при положительной величине разности $S_n - F'$, т. е. когда лучи крайней зоны пересекают ось дальше фокальной плоскости системы, сферическая aberrация считается **положительной**, а система—**переисправленной**.

Если на рис. 42 продолжим луч S_1 до пересечения его с фокальной плоскостью F' , то отрезок $F'S'_1$, обозначенный буквой z , будет называться **поперечной сферической aberrацией системы для точки на оси**. При таком положении в случае помещения фотографической пластинки в фокальной плоскости системы на пластинке получим некоторый кружок рассеяния, ограниченный радиусом z .

Из изложенного выше заключаем, что как продольная сферическая aberrация $\delta f'$, так и поперечная z , в определенной оптической системе при определенном ходе лучей зависят исключительно от высоты точки преломления на первой поверхности.

Обычно сферическая aberrация представляется графически в

виде кривой, причем по оси ординат откладывается высота входа лучей h , а по оси абсцисс—продольная сферическая aberrация, выраженная в линейной мере, т. е. в миллиметрах. Масштаб по оси абсцисс берется несколько большим, чем по оси ординат.

На рис. 43 показаны кривые сферической aberrации простой двояковыпуклой линзы (рис. 43,а) и фотографического объектива типа „Тессар“ Цейсса $f:4,5$ (рис. 43,б).

В фотографических объективах, состоящих из нескольких линз, коррекция на сферическую aberrацию достигается соответствующим подбором радиусов кривизны и коэффициентов преломления отдельных линз. Такое корректирование объектива имеет целью выпрямить кривую сферической aberrации или по крайней мере повернуть ее так, чтобы она пересекала ось ординат. Иначе говоря, при корректировании объектива обычно стремятся к тому, чтобы хотя один луч, входящий на высоте h , после прохождения через объектив пересекал оптическую ось в фокусе параксиальных (нулевых) лучей. Идеальная оптическая система дает кривую сферической aberrации в виде прямой, совпадающей с осью ординат, что практически абсолютно невозможно. В любом фото-кинообъективе для определенной корректированной зоны все же остается сферическая aberrация для лучей иной высоты, отличной от исправленной зоны.

Сферическая aberrация в фотокинообъективе является существенным недостатком, так как различные зоны объектива h дают резкое изображение предмета на различном расстоянии в пространстве изображения, вследствие чего на пластинке изображение предмета получается нерезким, хотя пластинка и будет установлена в плоскости наиболее резкого изображения, т. е. наилучшей установки. Результат этого явления выражается в виде кружков рассеяния, получаемых на пластинке от крайних лучей, пересекающих ось объектива до или после плоскости наилучшей установки.

Положение наилучшей плоскости установки зависит от величины остаточных сферических aberrаций отдельных зон преломляющих поверхностей и, как сказано выше, от формы кривых сферической aberrации. Диафрагмирование объектива, т. е. уменьшение его входного отверстия, меняет положение наилучшей плоскости резкой установки объектива, ввиду чего следует твердо помнить, что фотографирование необходимо производить при той же диафрагме в объективе, с какой была выполнена установка на резкость по матовому стеклу.

3. Условие синусов

Под **условием синусов** мы подразумеваем получение некоторого плоского элемента предмета, расположенного перпенди-

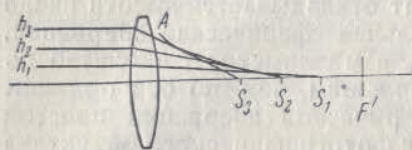


Рис. 41.

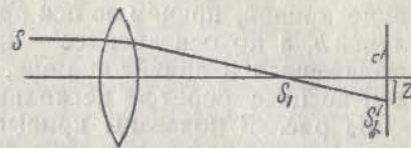


Рис. 42.

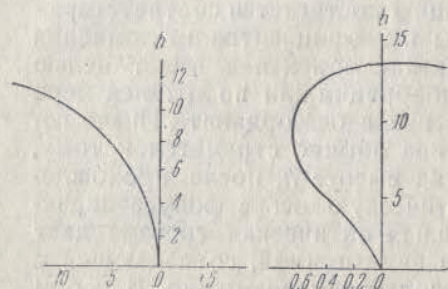


Рис. 43а.

Рис. 43б.

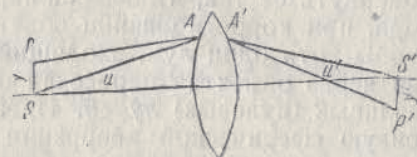


Рис. 44.

кулярно оптической оси, в виде плоского же сопряженного элемента, также перпендикулярного оптической оси. Исправление системы в отношении разобранный выше сферической aberrации для точки на оси не является гарантией того, что все точки элемента плоскости будут иметь хорошее резкое изображение в точке с исправленной сферической aberrацией.

Предположим, что некоторая оптическая система (рис. 44) дает от точки S луч SA под углом U и после преломления луч $A'S'$ собирается под углом U' .

В случае, когда коэффициент преломления в первой и последней среде один и тот же, уравнение примет вид:

$$\operatorname{tg} U \cdot y = \operatorname{tg} U' \cdot y'. \quad (41)$$

Это уравнение и послужило для вывода формулы поперечного увеличения, из которой видно, что увеличение не зависит от наклона луча. Но в случае превышения угла U увеличение будет вообще различно, если лучи будут проходить через различные зоны оптической системы. При таком положении построение сопряженной точки P' для лучей различных зон не будет совпадать и будет нерезким.

Выведенное уравнение (41) Лагранжа — Гельмгольца оказывается действительным только для малых углов U , для лучей же

с большим углом U и большим (широким) раствором в сечении верное решение задачи дано Аббе.

Основываясь на волновой природе света, Аббе доказал, что при конечной величине наклона лучей соотношение

$$\sin U' : \sin U = \text{const.} \quad (42)$$

является условием постоянства увеличения для всех зон оптической системы, свободной конечно от aberrации.

Для случая, когда показатель преломления среды в пространстве предмета равен n , а показатель преломления в пространстве изображения равен n' , условие синусов примет вид:

$$n' \sin U' : n \sin U = y : y' = \text{const.} \quad (43)$$

Следовательно исправленный в отношении кривизны изображения объектив для сопряженных точек должен иметь приведенное отношение (43) для всех лучей, проходящих через отверстие объектива.

Пара сопряженных точек, для которых исправлена сферическая aberrация лучей широкого пучка и кроме того выполнено условие синусов, называется парой апланатических точек.

Очевидно, что закон синусов будет терять всякий смысл, если одновременно будут существовать зоны сферической aberrации. Таким образом необходимо корригировать объектив для определенной зоны в отношении как сферической aberrации, так и закона синусов.

Объективы, исправленные в отношении сферической aberrации и закона синусов, иногда носят название апланатов.

4. Астигматизм

До сих пор мы рассматривали лишь точки, находящиеся на оптической оси. Рассмотрим теперь изображение точки, расположенной в стороне от оси. Если через ось тонкого пучка лучей от такой точки, входящих в линзу под некоторым углом, проведем две взаимно перпендикулярных плоскости, то эти плоскости пересекутся с поверхностями линз по кривым разных радиусов.

Представим себе, что на рис. 45 изображена большая сферическая поверхность, на которую из точки S падает тонкий пучок лучей.

Из рисунка видно, что меридиальные плоскости имеют меньшую кривизну, чем плоскости сагитальные.

Так как в наших прежних рассуждениях было указано, что фокусное расстояние и место фокуса зависит от радиусов кривизны,

визны всех поверхностей системы, то следовательно лучи таких двух плоскостей будут иметь разные места фокусов.

Очевидно, что после преломления пучок лучей, представленный на рис. 45, пойдет согласно рис. 46 и соберется в разных точках.

Если мы назовем лучи в плоскости рис. 45 меридианальными лучами, а в перпендикулярной плоскости—сагитальными, то для меридианальных лучей место фокуса будет в $S'm$, а для сагитальных—в $S's$, т. е. на наиболее близком расстоянии от линзы.

Разность расстояний ($S'm - S's$) называют астигматической разностью, а недостаток линзы—астигматизмом, причем астигматическая разность будет увеличиваться с увеличением угла наклона входящего пучка.

Таким образом идеальный гомоцентрический пучок лучей после преломления через сферическую поверхность делается астигматическим.

Геометрическое место пересечения лучей всех меридианальных сечений пучка образует первую фокальную линию; геометрическое место точек пересечения лучей всех сагитальных сечений пучка образует вторую фокальную линию. Обе фокальные линии взаимно перпендикулярны.

Астигматизм объектива сказывается в том, что при одном определенном положении плоскости наводки резко и отчетливо видны объекты, расположенные в меридианальной плоскости, а при другом положении резко видны объекты, расположенные в сагитальной плоскости.

Если объектом испытания служит плоский чертеж (рис. 47, а) больших размеров с вертикальными и горизонтальными линиями, то в случае астигматизма получится резкое изображение вертикальных линий (рис. 47, б) при установке матового стекла в сагитальной плоскости и отчетливое изображение горизонтальных линий при установке стекла в плоскость $S'm$ (рис. 47, в).

Астигматизм графически изображается следующим образом. По оси ординат откладываются углы входа α , по оси абсцисс—разность фокусных расстояний для меридианальных, а также и для сагитальных лучей. Чем меньше астигматизм, тем ближе друг к другу эти кривые. На рис. 48 приведены кривые астигматизма фотообъектива типа апланат.

Характер кривых говорит о том, что объектив совершенно не исправлен в отношении астигматизма.

Устранение астигматизма достигается применением сложной оптической системы, у которой соответствующим подбором радиусов, толщин отдельных линз, коэффициентом преломления, воздушными промежутками между линзами стараются уничтожить астигматизм для какого-нибудь определенного угла. Пол-



Рис. 45.

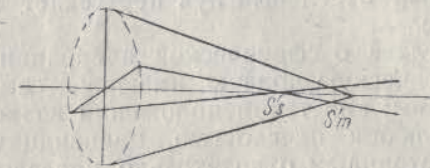
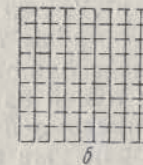


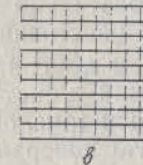
Рис. 46.



а



б



в

Рис. 47.

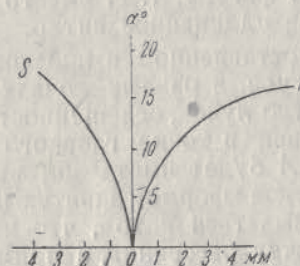


Рис. 48.

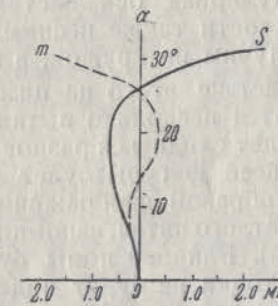


Рис. 49.

ного уничтожения астигматизма для нескольких значений угла α получить не удастся.

Фотообъективы, исправленные в отношении астигматизма, называются анастигматами. Характер кривых S и m для анастигмата типа „Тессар“ Цейсса приведем на рис. 49.

5. Кома. Аберрация наклонных пучков

Явление комы представляет собой сферическую аберрацию для лучей, направленных на объектив под некоторым углом. В этом случае при исправленном в отношении астигматизма

объективе все же остается весьма крупный недостаток, сильно сказывающийся на качестве изображения объектива.

На рис. 50 представлены три сопряженных луча в меридианальной плоскости, выходящих из точки A . Как видно из рисунка, каждый отдельный луч пересекает главный луч $P'A'$ в особой точке.

В главе о сферической аберрации на рис. 41 мы проводили каустическую кривую, имеющую симметричный вид, вокруг оси системы; при таком положении возможно, что сечение этой кривой любой плоскостью, перпендикулярной оси, будет также симметричным относительно последней.

Если бы пучок лучей (рис. 50) имел также симметричное строение, то два крайних луча пучка пересеклись бы в одной точке и следовательно точки A'_1 и A'_2 лежали бы в плоскости S' на равных расстояниях по обе стороны точки A' .

Совсем другой вид каустической поверхности получится, когда падающий в систему пучок лучей наклонен под некоторым углом к оси (рис. 50). После преломления мы также получим каустическую поверхность, которая уже в общем не будет симметричной вокруг главного пучка луча. Поэтому плоскость, перпендикулярная оси системы, вырежет из этой каустической поверхности также несимметричную фигуру, т. е. вместо точки мы получим не кружок, а некоторое удлиненное пятно.

Вследствие этого на пластинке, поставленной в плоскости S' , получится несколько вытянутая фигура, в разных точках которой будет сходиться разное количество лучей; освещенность площади всей фигуры будет наибольшей в точке главного луча. Таким образом изображение точки A будет иметь вид вытянутого светлого пятна, напоминающего своей формой запятую (кома-запятая). Влияние комы будет сказываться в том, что изображение точки не будет подобно кружку рассеяния, а примет некоторую хвостобразную форму.

Очевидно, что с увеличением угла наклона входящих в систему лучей влияние комы будет сказываться сильнее.

Если обозначим отрезок $S'A'$ (рис. 50) знаком y' , отрезок $S'A'_1$ — y'_1 и $S'A'_2$ — y'_2 , то количественно кому K можно характеризовать следующим уравнением:

$$K = \frac{1}{2}(y'_1 + y'_2) - y'. \quad (44)$$

На рис. 51 показаны кривые, полученные фотографированием простой собирающей линзой небольшой круглой диафрагмы, расположенной в стороне от оси линзы.

Фигура a получена на пластинке, установленной в плоскости

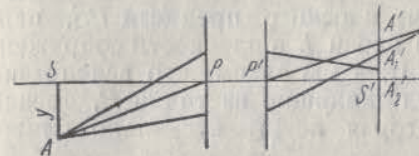


Рис. 50.

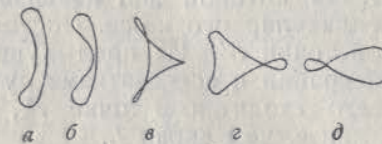


Рис. 51.

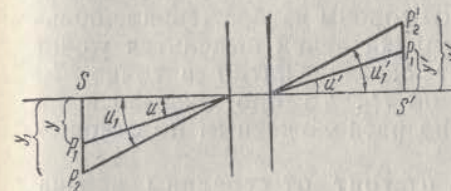


Рис. 52.

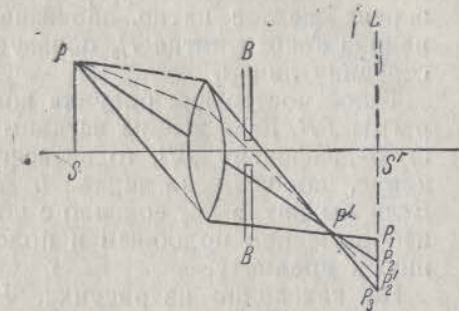


Рис. 53.

между системой и фокальной плоскостью; кривая $б$ соответствует плоскости, проходящей через S' . Кривые $в$, $г$ и $д$ получены на пластинках, установленных в разных плоскостях вправо за фокальной плоскостью.

6. Дисторсия. Условие ортоскопии

Условие ортоскопии состоит в том, что предмет и изображение должны быть подобны между собой во всех своих частях, иначе говоря, поперечное линейное увеличение должно быть постоянным для сопряжения точек.

Допустим, что точки P'_2 и P'_1 (рис. 52) пересечения главных лучей с плоскостью P'_2S' будут центрами сходящихся гомоцентрических пучков. Тогда плоскость P'_2S' будет местом резкого изображения предмета SP_2 , т. е. плоскостью наводки. Отсюда однако еще не следует, что изображение предмета подобно оригиналу, так как линейное увеличение y' и y'_1 вдоль плоскости P'_2S' , перпендикулярной к оси, может быть и не постоянным.

Следовательно на этой плоскости может быть хотя и резкое, но искаженное изображение предмета. Упомянутое явление называется **дисторсией**.

Различие в увеличениях при изображении плоского предмета влечет за собою искажение в изображении. Для пояснения двух противоположных искажений приводим следующие примеры.

Представим (рис. 53), что SS' является осью двояковыпуклого стекла, которое дает изображение плоского предмета PS , перпендикулярного к оси. Поставим экран L в плоскости сопряженной точки S' . Из предыдущих глав мы знаем, что вследствие aberrаций и астигматизма лучи, выходящие из точки P , теснее всего сходятся в точке P' , которая лежит несколько ближе к линзе, чем экран L .

За этой точкой P' лучи опять расходятся и производят на экране светлое пятно, обозначенное на рисунке через P_1P_2 . Середина такого пятна P_2 образуется лучами, проходящими через середину линзы.

Такое построение рисунка возможно, если бы не было диафрагмы BB . Если же мы вставим со стороны изображения небольшую диафрагму BB , то из всего пучка лучей выделится узкий конус, который на экране L даст светлое пятно в точке P'_2 . Если бы пятно P'_2 совпало с точкой P_2 , то оно оказалось бы изображением подобным и подобно расположенным по отношению к предмету.

Но, как видно из рисунка, P'_2 отстоит от середины экрана далее, чем P_2 , вследствие чего изображение в краевых частях окажется растянутым, что и дает искривление изображения.

Разумеется, искривление будет тем значительнее, чем дальше точка P предмета будет находиться от оси линзы.

Рис. 54 дает случай искривления изображения точки P , но уже в центральной зоне; такое явление имеет место при диафрагме, установленной в пространстве предмета, т. е. перед линзой.

Все обозначения на этом рисунке вполне совпадают с обозначениями рис. 53. Таким образом диафрагма со стороны предмета пропускает только те лучи, которые дают на экране светлое пятно, лежащее в точке P'_2 , ближе к оси, чем точка P_2 .

Следовательно в рассмотренных нами двух случаях дисторсии при разных положениях диафрагмы относительно линзы будем иметь в первом случае искривление по краю изображения и во втором случае — искривление в центре изображения.

Если объектом будет служить чертеж с сеткой квадратов (рис. 55), то получатся искаженные изображения такой сетки, представленные на рис. 56.

Рис. 56, *a*, дает нам подушкообразную дисторсию в случае помещения диафрагмы в пространстве изображения, рис. 56, *б* дает бочкообразную дисторсию при диафрагме, расположенной в пространстве предмета. В первом случае увеличение по краям изображения больше, чем к середине, в последнем — увеличение в центре изображения больше, нежели к краям.

Мы уже упомянули, что условие ортоскопии состоит в том, что предмет и изображение должны быть подобны между собой

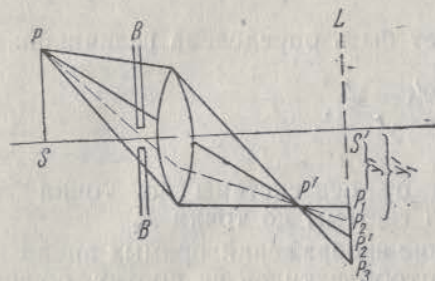


Рис. 54.

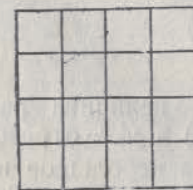


Рис. 55.

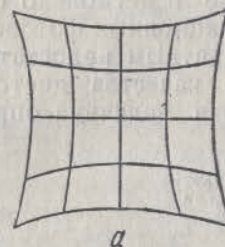


Рис. 56а.

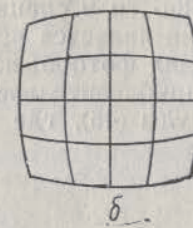


Рис. 56б.

во всех своих частях; аналитически это условие выражается рядом отношений (рис. 52):

$$\frac{y'_1}{y_1} = \frac{y'_2}{y_2},$$

где y_1 и y_2 — ординаты точек предмета, а y'_1 и y'_2 — соответственные ординаты точек изображения.

Взяв отношения:

$$\frac{t_g U'_1}{t_g U_1} = \frac{y'_1}{y_1},$$

$$\frac{t_g U'_2}{t_g U_2} = \frac{y'_2}{y_2},$$

можно условие ортоскопии написать:

$$\frac{t_g U'_1}{t_g U_1} = \frac{t_g U'_2}{t_g U_2} = \frac{y'_1}{y_1} = \frac{y'_2}{y_2}, \quad (45)$$

т. е. увеличение для всех углов должно быть постоянным.

Численно дисторсия D может быть определена величиной:

$$D = \frac{y'_1 - y'}{y'}, \quad (46)$$

где y'_1 — величина расстояния от оси системы до точки P'_2 (рис. 54) и y' — отрезок от оси системы до точки P .

Весьма небольшое искривление изображений прямых линий на краях поля зрения обычных фотообъективов не портит общего впечатления от снимка. Но в киносъемочных объективах, где изображение увеличивается на экране в несколько сот раз, и в особенности в специальных репродукционных фотообъективах, дисторсия является чрезвычайно неприятным недостатком. Нормально для фотообъективов высокого качества дисторсия равняется приблизительно 0,5%; последняя величина определяется из формулы (46), где

$$D = 100 \frac{y'_1 - y'}{y'} \%. \quad (47)$$

Из примеров, приведенных на рис. 53 и 54, вытекает, что наименьшее значение дисторсии будет в симметричных системах, где диафрагма находится посредине фотообъектива, между первой и второй симметричными половинками объектива.

7. Хроматическая аберрация

В предыдущих разделах настоящей главы мы рассматривали отдельные случаи сферических аберраций при условии, что проходящий через оптическую систему свет был однороден, т. е. монохроматичен. В действительности же проходящий через оптическую систему свет — сложный, состоящий из лучей различной длины волн, вследствие чего входящий в систему на некоторой высоте h луч белого света после выхода из нее не пойдет по одному направлению, а ввиду различной преломляемости отдельных цветных лучей, пересечется с осью системы в разных точках. Это подтверждается тем, что коэффициент преломления для различных волн имеет различные значения, — что подробно было разобрано в главе I.

Так как коэффициент (показатель) преломления увеличивается от красного края спектра к фиолетовому, то в случае простой положительной линзы фокусное расстояние для красных лучей будет большим, нежели для фиолетовых, т. е. красные лучи соберутся на оси системы несколько дальше фиолетовых.

Предположим, что рис. 57 представляет вполне исправленную

положительную оптическую систему в отношении лучей какого-либо определенного цвета.

Пучок параллельных оси системы лучей обычного сложного цвета падает на систему и по выходе из нее, вследствие дисперсии, собирается в точках S'_F и S'_C , где S'_F — пересечение синих лучей и S'_C — красных. Поставив пластинку в фокальную плоскость синих лучей, получим на ней синюю точку, окруженную красным ореолом; переставив пластинку в плоскость S'_C , получим красную точку с синим кружком.

Обозначив расстояние от вершины системы O до фокуса синих лучей — S'_F , расстояние до фокуса красных лучей — S'_C , определим разность расстояний обоих изображений от точки O

$$S'_F - S'_C \quad (48)$$

как продольную хроматическую аберрацию, или хроматическую аберрацию положения изображения.

На нашем примере продольная хроматическая аберрация меньше нуля, и система считается недоисправленной в отношении хроматической аберрации. Если же аберрация будет больше нуля, то такую систему относят к переисправленной.

Исправив оптическую систему в отношении хроматизма для двух различных цветов, так, чтобы точки фокусов этих лучей совпадали на оси, мы еще не устраним этим окраски изображения точек, лежащих вне оси.

Это явление может иметь место вследствие того, что главные плоскости лучей различной длин волн могут оказаться несовмещенными и фокусные расстояния для них будут различны.

На рис. 58 H'_F и H'_C — главные задние плоскости для синего и красного лучей — находятся в системе несовмещенными, хотя в главной фокальной плоскости S' эти лучи и собрались в одной точке.

Так как по формуле линейного увеличения масштаб изображения определяется отношением

$$\frac{f}{x},$$

то очевидно вследствие разности фокусных расстояний лучей F и C точки, не лежащие на оси системы, изобразятся лучами различных цветов на различных расстояниях от оси, что в конечном итоге даст изображения, окруженные радужной каемкой.

Вышеуказанное явление носит название хроматической разности увеличения. Если совместить как фокальные, так и глав-

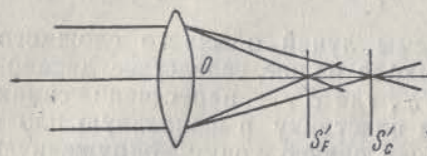


Рис. 57.

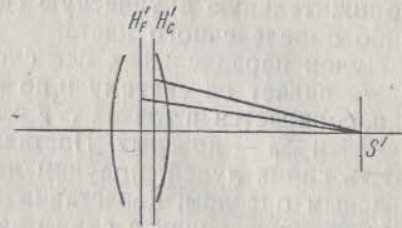


Рис. 58.

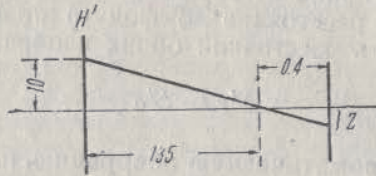


Рис. 59.

ные плоскости для двух различных лучей, то будут уничтожены и продольная хроматическая aberrация, и хроматическая разность увеличения. Такая система называется **ахроматической**.

Обычно в фотообъективе хроматическая aberrация устраняется для лучей D (желтых) и G' (фиолетовых). Такой характер исправления хроматизма называется **актинической коррекцией**. При таком исправлении системы после установки объектива на наилучшее резкое изображение, которое производится в плоскости желтых лучей, лучше всего воспринимаемых глазом, светочувствительный слой пластинки окажется в плоскости фокуса лучей G' , обладающих наибольшим химическим действием на фотоэмульсию.

В объективах, предназначенных для цветной фотографии, устранение хроматизма для двух цветов является недостаточным. Совершенно очевидно, что система, исправленная для лучей двух цветов, все еще дает хроматическую aberrацию для лучей других цветов. Это явление называется **вторичным спектром**. Для его уменьшения или уничтожения соединяют не два луча, а три. Фотообъективы, у которых устранен хроматизм для лучей трех цветов, называются **апохроматами**. Для представления о величине хроматической aberrации даются или кривые изменения фокусного расстояния с длиной волны определенной зоны, или дается разность фокусных расстояний для лучей определенных цветов.

Уничтожение хроматизма достигается путем соответствующего подбора оптического стекла с разными показателями преломления для одних и тех же цветов. Задача эта весьма трудна:

практически совместить в одной фокальной плоскости изображения для всех длин волн не представляется возможным. Обычно в лучших фотообъективах добиваются совмещения двух-трех цветов.

Примеры и задачи к IV главе

1. Фотообъектив, исследованный на остаточную продольную сферическую aberrацию, дал следующие величины фокусных расстояний для лучей, падающих на объектив в разных зонах:

Фокусное расстояние параксиальных лучей исследованного объектива					равно 135,4 мм
Фокусное расстояние лучей на высоте	$h = 5$	мм	"	"	135,2 "
"	$h = 7$	"	"	"	135,1 "
"	$h = 10$	"	"	"	135,0 "
"	$h = 13$	"	"	"	135,4 "
"	$h = 15$	"	"	"	135,8 "

Необходимо построить кривую продольной сферической aberrации этого объектива.

2. Определите величину поперечной сферической aberrации объектива, у которого продольная сферическая aberrация равна 0,4 мм и приведена на рис. 59.

3. Каким образом можно отчасти устранить сферическую aberrацию в фотообъективе?

4. Разберем случай условия апланатизма (условие синусов), когда предмет лежит на бесконечно большом расстоянии и где:

$$\sin U' = \frac{h}{f'}$$

Если h — высота выхода луча из системы, тогда условие синусов напишется:

$$\frac{h}{\sin U'} = f'$$

5. Соблюдено ли условие синусов в системе, указанной на рис. 60, у которой углы:

$$U_1 = 2^\circ 30'; U_2 = 1^\circ 15'; U'_1 = 2^\circ 30' \text{ и } U'_2 = 1^\circ 15'.$$

В этом случае будет ли изображение $S'P'$ действительно плоским?

6. Определим величину астигматической разности в кинообъ-

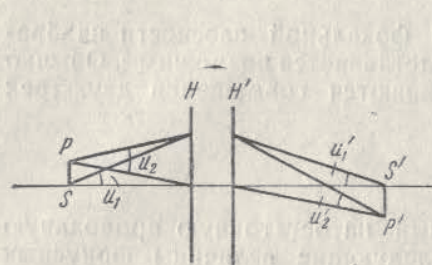


Рис. 60.

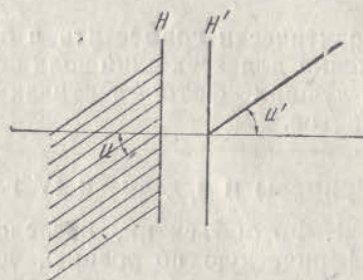


Рис. 61.

ективе, у которого фокус меридианальных лучей равен 49,6 мм, а фокус сагитальных лучей—49,2 мм

$$49,6 - 49,2 = 0,4 \text{ мм.}$$

Следовательно величина астигматизма такого объектива для определенного угла лучей, падающих на объектив, будет равна 0,4 мм.

7. Какое действие производит цилиндрическая линза, и можно ли ею изменить кривую астигматизма?

8. Если в качестве предмета взять небольшую диафрагму, то в случае астигматизма какое изображение получим на матовом стекле при установке его в двух разных плоскостях?

9. На рис. 61 показан ход параллельного луча, падающего на переднюю главную плоскость объектива под некоторым углом.

Требуется, во-первых, построить изображение этого пучка около главного луча U' от задней главной плоскости объектива, некоррегированного в отношении комы, во-вторых, построить каустическую поверхность вокруг главного луча.

10. Постройте изображение окна в случае бочкообразной дисторсии.

11. Докажите преимущество в отношении наименьшей дисторсии среднего положения диафрагмы в симметричной системе объектива.

12. Яркое представление о дисторсии можно получить при рассматривании простой лупой (с одной двояковыпуклой линзой) обычной клетчатой бумаги.

13. На рис. 57 приведен случай хроматической aberrации простой линзы. Исправление ее, т. е. создание такого положения, когда лучи F и C собрались бы в одной точке, возможно путем присоединения отрицательной линзы к упомянутой выше собирательной. Разумеется, отрицательная линза должна быть изго-

товлена из стекла с иным показателем преломления для направляемого луча. В простой двояковыпуклой линзе без дополнительного присоединения к ней другого стекла уничтожить хроматическую aberrацию невозможно.

14. Какова величина хроматической aberrации объектива, у которого $f'_C = 145,7$, а $f'_F = 145,4$ и какого знака эта aberrация?

15. Почему в фотографических объективах устраняют хроматическую aberrацию для желтых (D) и фиолетовых (G) лучей, а в объективах, употребляющихся в биноклях и трубах, хроматическую aberrацию устраняют для желтых и красных лучей?

1. Краткая история развития фотографического объектива

Наиболее точное описание камеры-обскуры было дано Леонардо да-Винчи (1452—1519 гг.) с указанием схемы расположения отверстия, хода световых лучей и получаемого на экране изображения.

Описание камеры-обскуры с линзой, т. е. прототипа фотокамеры, мы впервые находим в сочинении Барбаро (Barbaro 1568 г.); в этом сочинении говорится о камере-обскуры с линзой плоско-выпуклой конструкции.

Таким образом, более чем за 200 лет до изобретения фотографии, в основном была решена задача построения фотографического аппарата на принципе камеры-обскуры с линзой. В 1812 г. физик Волластон впервые применил собирательный мениск к камере-обскуры для рисования ландшафтов. Изображенный на рис. 62 мениск имел диаметр около 100 мм и фокусное расстояние 560 мм.

Изобретение первых фотографических объективов следует отнести к периоду опытных работ Дагерра и Ньепса (1824—1837 гг.). Первые оптические системы, которые употреблял в своих опытах по фотографии Дагерр, изготовлял французский оптик Шевалье. В 1821 г. им была построена ахроматическая линза, склеенная из двух стекол (рис. 63) с $f' = 380$ мм и относительным отверстием 1:14. Несколько позже Шевалье построил на основании ряда опытных работ „универсальный“ фотообъектив, изображенный на рис. 64.

Первые работы по фотографированию, по вполне понятным причинам, вращались около портретной съемки. Незначительная светосила применяемых при этом объективов требовала их усовершенствования. В 1840 г. математик Петцваль решил на основании математического расчета вычислить фотографический объектив, отвечающий основным требованиям. В конце 1840 г. эта работа была закончена изготовлением портретного объектива с отверстием 1:3,4; в этом объективе были уничтожены сферическая aberrация и астигматизм наклонных пучков (рис. 65).

В 1860 г. Дальмейер изготовил тройную ахроматическую линзу (рис. 66). Этот объектив имел перед объективом Петцваля то преимущество, что он был рассчитан для поля зрения 24° и имел коррекцию для лучей G' .

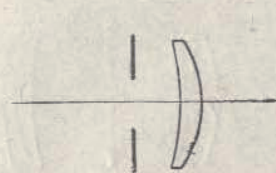


Рис. 62.

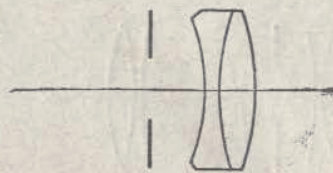


Рис. 63.

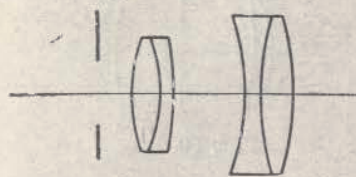


Рис. 64.

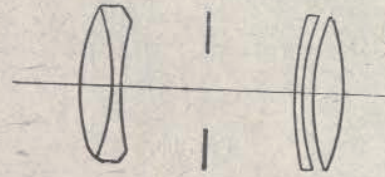


Рис. 65.

В 1864 г. впервые были выпущены несимметричные дублеты (фирма Росс), свободные от искажения и кривизны изображения с полем зрения в 36° (рис. 67). Несколько ранее Фохтлендер выпускает объектив, состоящий из трех склеенных линз (рис. 68) со светосилой 1:4,4 и $f' = 574$ мм.

В 1865—1866 гг. выпускается серия апланатов (фирма Штейнгель); вначале был изготовлен перископ, состоящий из двух простых неахроматизированных менисков с диафрагмой посредине (рис. 69). Позже перископ был ахроматизирован путем изготовления ахроматических систем, также симметрично расположенных относительно диафрагмы (рис. 70). Эти объективы были названы апланатами и имели хорошую коррекцию на сферическую aberrацию с соблюдением условия ортоскопии. В 1881 г. были выпущены антипланаты, обладающие значительным преимуществом в отношении искривления изображения и астигматической разности.

Дальнейшие попытки оптиков изготовить более совершенные типы фотообъективов оказались тщетными. Казалось, достигнуто было все, что возможно было сделать с имеющимися в то время сортами оптического сырого стекла. Было очевидно, что дальнейшее усовершенствование фотообъективов возможно на основании введения в производство новых сортов оптического стекла, с которыми вычислителю удалось бы решить задачу построения более совершенных оптических систем.

В 1883—1884 гг. вопрос о производстве новых оптических стекол был блестяще решен. С этого времени и начался выпуск

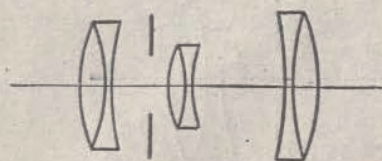


Рис. 66.

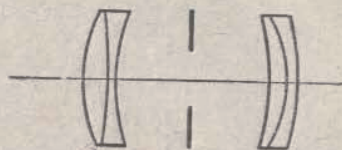


Рис. 67.

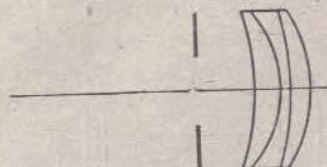


Рис. 68.

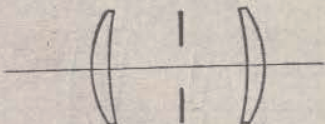


Рис. 69.

более совершенных фотообъективов, не имевших астигматизма — главного недостатка в объективах старых конструкций.

Первые объективы типа анастигматов начали выпускаться с 1887 г.: симметричный дублет (Аббе), в котором была практически уничтожена хроматическая разность сферических aberrаций (рис. 71); Протар (Рудольфа) с уничтоженным астигматизмом (рис. 72); Дагор (Хега) с отверстием 1:6,8 и большим углом (рис. 73) и т. д.

В 1893 г. Тейлор дает очень изящное решение построения анастигмата из трех линз (рис. 74). Указанная конструкция весьма проста и послужила основанием для выпуска целой серии анастигматов (Гелиар, Тессар, Динар, Триоплан и т. д.), изготовляемых разными оптическими фирмами.

С выпуском хороших универсальных анастигматов, со светосилою 1:3,5, дальнейшее развитие фотооптики приостановилось вплоть до 1918 г. Начиная с этого года, в связи с бурным развитием кинотехники, к кино съемочным объективам стали предъявлять требования особо светосильной оптики.

Конструкторская деятельность различных оптических заводов дала рынку целую серию светосильной оптики. Начиная с объектива „Эрностар“ 1:2, были выпущены в разное время следующие светосильные кинообъективы: Тахар 1:1,8, Плазмат 1:1,5, Биотар 1:1,4 и т. д. В самое последнее время фирма Астро выпустила сверхсветосильный объектив Тахон 1:0,95 с фокусными расстояниями 25, 35 и 75 мм¹.

¹ Вследствие конструктивных особенностей съемочных аппаратов типа Дебри, Бэл-Хауэлл и Аскания, объектив Тахон может быть использован лишь в пределах фокусного расстояния 52 и 75 мм.

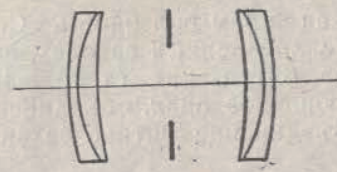


Рис. 70.

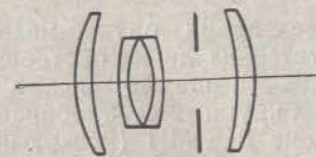


Рис. 71.

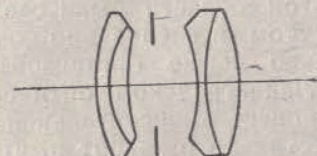


Рис. 72.

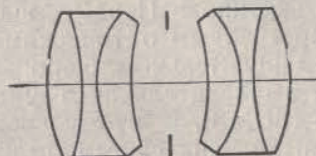


Рис. 73.

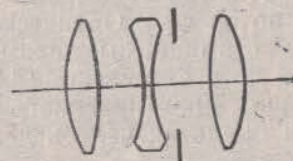


Рис. 74.

Разумеется, значительная светосила современных анастигматов вследствие неполного уничтожения aberrаций для крайних зон не дает никаких преимуществ в оптическом качестве этих объективов сравнительно с объективами средней светосилы.

В качестве последней новинки в области сверхсветосильной оптики укажем на выпуск Цейссом нового объектива для рентгенокино съемки с пульсирующих органов внутри живого организма. Объектив этот, под названием „Р-Биотар“ имеет светосилу 1:0,85, превосходящую в три раза светосилу „Биотара“ 1:1,4 (подробное описание см. в журнале „Die photographische Industrie“ 1933 г. № 10).

Переходим к истории фотографической оптики в СССР.

До революции в России не было оптических заводов, изготовлявших фотообъективы, за исключением единственной оптической мастерской в Варшаве, выпустившей в 1911 г. анастигмат собственной конструкции. Упомянутая мастерская была в 1914 г. эвакуирована в Ленинград и слилась с оптическим отделом б. Обуховского завода.

Существующая в СССР советская оптическая промышленность является в буквальном смысле слова детищем Октября. В на-

стоящее время оптико-механическая промышленность Союза базируется на двух собственных стекловаренных заводах, выпускающих свыше 45 разных сортов оптических стекол, и на четырех крупных стеклообрабатывающих заводах, объединенных в системе ВООМГ (Всесоюзное объединение оптико-механической промышленности).

Производству советских фотографических объективов предшествовали изучение и исследование лучших зарубежных фотокинообъективов. Первые шаги в этой области были сделаны Государственным оптическим институтом в специально созданном вычислительном бюро. Несколько позже организовалась другая вычислительная группа на Ленинградском оптическом заводе (ГОМЗ). К этому времени процесс вычислительной техники оптических систем был уже настолько разработан, что не представляло особого труда создание более мелких вычислительных групп и на других заводах.

Первым советским фотообъективом был объектив типа перископа, изготовленный по расчету Оптического института.

В 1925—1926 гг. были выпущены первые трехлинзовые анастигматы типа Триплет со светосилою 1:4,5 и 1:3,5.

Упомянутые объективы промышленного распространения не получили, так как они предназначались для уже существующих фотокамер.

С выпуском же своих советских фотоаппаратов, для последних были изготовлены объективы Ортогиз и анастигмат Индустар. Кроме того для камеры типа Лейка были изготовлены фотообъективы Пионер с отверстием 1:3,5.

В настоящее время советская оптическая промышленность разработала и выпускает помимо указанных выше объективов ряд прекрасных анастигматов со светосилою до 1:2,0, группу репродукционных объективов и т. д.

Объективы Индустар и Пионер по своему оптическому качеству не уступают лучшим образцам зарубежной фотооптики, т. е. наша молодая советская оптическая промышленность уже успешно производит весьма сложные анастигматы.

2. Описание различных типов фотографических объективов и оценка их качества

Основным техническим средством фотографии является объектив. Его назначение в том, чтобы получить на пленке или фотопластинке изображение предмета, резкое на всем его протяжении и строго перспективное, т. е. производящее на глаз то же впечатление, какое производит самый предмет. Такой объектив должен быть свободен от всех недостатков, указанных нами выше. До настоящего времени нет идеального объектива,

отвечающего полностью всем требованиям. Все имеющиеся объективы разделяют на ряд специальных групп. Границы между отдельными группами фотообъективов часто легко стираются, ибо один и тот же объектив может быть применим для разных целей.

Под фотографическим объективом следует вообще подразумевать любую оптическую систему, состоящую из ряда положительных и отрицательных линз, расположенных в разных вариантах и дающих обратное действительное изображение предмета на конечном расстоянии от системы.

С развитием фотооптики появилось весьма большое количество различных фотографических объективов. Дать характеристику и качественную оценку всем объективам абсолютно невозможно и, пожалуй, нецелесообразно, ввиду чего в настоящей главе будут разобраны и представлены наиболее типичные и оригинальные фотообъективы.

В настоящее время все фотографические объективы могут быть разбиты на следующие группы:

- киноремонтные объективы,
- портретные объективы,
- универсальные объективы,
- репродукционные объективы и
- телеобъективы.

Группа киноремонтных объективов представляет собой обычные фотографические объективы с максимальной светосилой и относительно небольшим фокусным расстоянием в пределах 25—120 мм.

Максимальная светосила киноремонтного объектива необходима вследствие того, что в условиях наименее выгодного освещения техника съемки требует определенной короткой экспозиции. В разделе „История фотографического объектива“ мы уже упоминали о современных светосильных кинообъективах Цейсса—„Биотар“ 1:0,85 и „Астро-тахон“ 1:0,95. Отметим еще новый объектив, специально предназначенный для киноремонта, изготовленный фирмой Sackenkroll, относящийся к типу анастигматов со светосилой 1:1, под названием „Paritar 1' : 1“.

Так как основные требования, предъявляемые к киноремонтным объективам, аналогичны и для фотообъективов нижеследующих групп, то нет необходимости особо на них останавливаться.

Портретные объективы—объективы большой светосилы (в пределах 1:3,5—1:4,5) с уничтоженной сферической абберацией и астигматизмом косых пучков. Поле зрения этих объективов небольшое при малой глубине фокуса. В последнее время большая часть потребителей стала требовать от портретного объектива некоторой художественной мягкости изображения. Для этой цели фирма Буш (Германия) выпустила специально вычислен-

ный объектив „Nicola Perscheid $f:4,5$ “ с остаточной сферической и хроматической аберрациями определенного размера. Фирма Фохтлендер для этой же цели выпустила фотообъектив „Гелиар“ $1:4,5$ (рис. 75) с перемещаемой средней линзой. В нормальном положении этот объектив работает с точно такой же резкостью, как это присуще обычному „гелиару“. Если же, вращая переднее кольцо, переставить среднюю линзу, можно достигнуть любой желаемой степени художественной мягкости.

Универсальные объективы являются наиболее совершенными и распространенными фотографическими объективами.

Объективы этой группы должны быть пригодны для многих целей, следовательно они должны иметь максимальную светосилу, большое поле зрения и быть свободными от целого ряда ошибок. В зависимости от числа требований увеличивается конструктивная сложность объектива для устранения недостатков изображения. Существовавшие до появления универсальных объективов портретные и ландшафтные объективы имели крупный недостаток — плохую коррекцию астигматизма. Следовательно наиважнейшей задачей при конструировании универсальных объективов было исправление астигматизма, вследствие чего современные универсальные фотообъективы носят еще название анастигматов.

Универсальные объективы изготавливаются со светосилой от $1:3,5$ до $1:7$. Поле изображения у них больше 50° , и для этого же угла необходимы как анастигматическое выравнивание плоскости изображения, так и отсутствие дисторсии.

Универсальные объективы распадаются на две группы фотообъективов — симметричные анастигматы и несимметричные. Несколько особняком стоят широкоугольные объективы со средней резкостью, но с хорошей коррекцией в отношении дисперсии и астигматизма. Отметим весьма широкоугольный объектив Герца — „Гипергон“, с углом в 140° . В настоящее время этот объектив выпускает фирма Цейсса.

Для репродукции требуется объектив, который при фотографировании рисунка, лежащего в одной плоскости, давал бы абсолютную резкость. В этом случае требуются хорошая точность перспективы, отсутствие искривления, большое поле зрения и совершенно плоское изображение.

Вопросы светосилы и глубины фокуса для репродукционных объективов несущественны. В случае трехцветной печати весьма желательно уменьшение вторичного спектра. К этой группе объективов следует отнести „Апохроматтесар“ Цейса и „Коллинеар“ Фохтлендера.

Телеобъективы предназначаются для фотографирования весьма

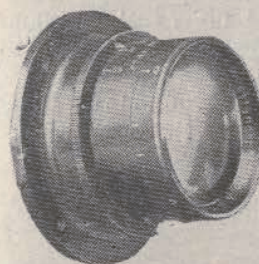


Рис. 75.

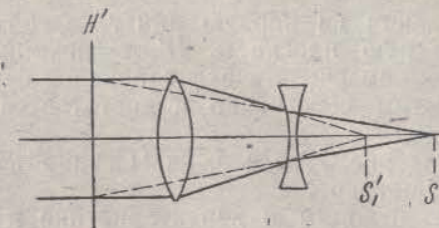


Рис. 76.

далеких предметов в возможно крупном масштабе, который, как видно из формулы линейного увеличения

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{x},$$

зависит от величины фокусного расстояния. Из приведенной формулы видно, что при данной величине предмета y , при значительном расстоянии x этого предмета от переднего фокуса объектива, для получения возможно большего изображения y' необходимо значительное фокусное расстояние системы. Разумеется, это весьма ограничивает размеры фокусного расстояния, так как пропорционально увеличивается и длина фотографической камеры.

Для устранения подобного неудобства и употребляются телеобъективы, в которых передняя собирающая линза соединена с рассеивающей задней линзой, находящейся на некотором расстоянии от первой. Такое положение линз в телеобъективе приводит к тому, что задняя главная плоскость всей системы будет находиться перед объективом, а следовательно фокусное расстояние телеобъектива будет длиннее, чем длина вытянутой камеры, т. е. расстояние от последней поверхности объектива до пластинки или фильма.

Ход лучей в телеобъективе представлен на рис. 76. Лучи, идущие от бесконечно удаленной точки предмета, лежащей на оси системы, падают на первую собирающую линзу телеобъектива параллельно ее оси; поэтому они должны были бы собраться в фокусе S'_1 , если бы не существовало второй рассеивающей линзы. Встретив отрицательную линзу, лучи преломляются ею и собираются на оси системы S' , но уже под меньшим углом; точка S' и будет очевидно фокусом эквивалентной системы в пространстве изображения. Продолжив направление лучей из точки S' до пересечения их с лучами, ограничивающими высоту

падения на первую линзу телеобъектива, мы получим заднюю главную плоскость H' телескопической системы, от которой и будем считать эквивалентное фокусное расстояние.

Этим собственно и достигается уменьшение длины фотокамеры.

На рис. 77, а и б, даны телеобъективы Цейсса—„Теле-тессар“ и „Магнар“.

Переходим к характеристике и оценке качества различных фото-кинообъективов.

Несколько предварительных слов к этому, наиболее серьезному и ответственному разделу настоящей книги. Во всех просмотренных автором советских изданиях по фотооптике (обычно этот отдел изложен в различных руководствах по фотографии) оценка и описание того или иного объектива даются в большинстве случаев на основании рекламного материала фирмы или на основании личного, субъективного мнения составителя той или иной книги.

Такого рода оценка конечно далека от истины, дает неправильное толкование назначения разбираемого объектива и вводит в заблуждение читателя, выбирающего на основании описания необходимый для него объектив.

Совершенно естественно, что мы отвергли подобный способ рекламации фотообъективов и постарались дать более объективную оценку их, на основании детальной проработки всего литературного материала, по первоисточникам (патентные заявки, статьи в журналах об испытании объективов и т. д.), точного тригонометрического просчета и составления кривых аберраций, которые и послужили мерой оценки качества и оптических постоянных объективов.

Основные оптические данные разбираемых ниже объективов в виде радиусов, толщины стекла, воздушных промежутков и показателей преломления мы получим из трех основных источников, единственных в мировой оптической литературе:

1) M. v. Rohr, Theorie und Geschichte des photographischen objektivs, Berlin, 1899.

2) E. Turriere, Optique industrielle, Paris, 1920.

3) W. Merte, R. Richter, M. v. Rohr, Das photographische Objektiv (Band 1—Handbuch der wissenschaftlichen und angewandten Photographie), Wien, 1932.

Кроме того упомянутые в названных книгах оптические величины, были непосредственно проверены и сличены с величинами, опубликованными или в патентах или в журнальных статьях; таким образом просмотрены данные около 100 различных фотообъективов.

Эти данные и послужили основанием для производства три-

гонометрического просчета, в результате чего ниже приведены кривые различных ошибок объектива.

Большинство кривых погрешностей взяты из книги W. Merte, который получил их непосредственно из вычислительных бюро различных фирм; часть материала представлена на основании проверочных расчетов, произведенных в разное время Государственным оптическим институтом, и наконец некоторая доля кривых аберраций выведена нами.

Хотя весь материал, который вызвал в той или иной форме сомнение, и исключен из нашей книги, справедливость все же требует отметить, что как бы ни был правилен представленный нами материал кривых погрешностей объективов, он не может дать окончательное заключение об оптических качествах объектива без данных экспериментальной опытной проверки его на специальных приборах.

Последнее конечно не умаляет достоинства наших рассуждений о качестве фотообъективов на основе кривых аберраций, но делает их в некоторых случаях не совсем полными. Это—единственный объективный метод оценки.

По всем объективам кривые ошибок представлены в следующем стандартном виде: под буквой А (рис. 78) соответствующего рисунка дана в виде сплошной линии кривая сферической аберрации; пунктиром показано отклонение от условия синусов.

Кривая, обозначенная буквой В, дает оценку астигматизма, причем сплошная линия относится к сагитальной плоскости, а пунктирная—к меридианальной.

Кривая В означает дисторсию, выраженную в процентах.

У кривых А и В числа на оси абсцисс дают отклонения в миллиметрах; числа оси ординат дают по кривой А высоту падения h , а на кривой В—углы падения пучка.

Кривая В дана по форме Wandersleb'a, где на оси абсцисс приведены углы падения лучей и на оси ординат—ошибки искривления в процентах.

Масштаб кривых разный, в зависимости от погрешностей объектива, но в следующем пропорциональном отношении 1:10:100.

Приведенные нами всюду оптические данные отнесены к фокусному расстоянию объектива в 100,0 мм. Светосила объектива и поле зрения определяются по кривым.

3. Простейшие фотообъективы

Простейшим фотообъективом мы должны назвать оптическую систему, состоящую из одного стекла в виде собирающей линзы. Так как конструкция линзы имеет минимум корригиру-

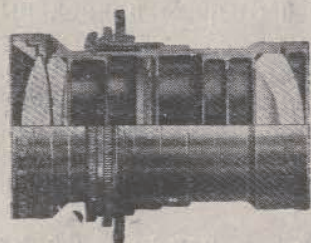


Рис. 77а.

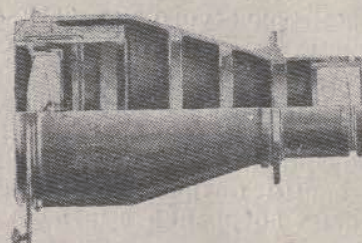


Рис. 77б.

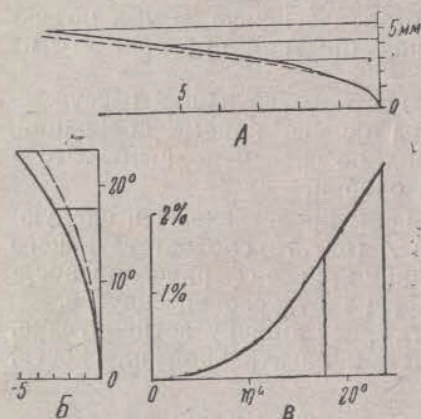


Рис. 78.

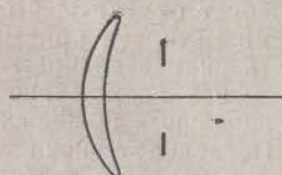


Рис. 79.

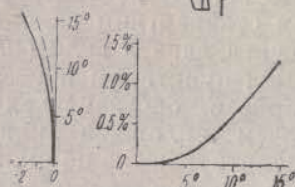


Рис. 80.

щих элементов, то ошибки такой линзы весьма велики. Однако интерес к таким линзам сохранен и до сих пор вследствие своеобразного эффекта общей размытости изображения от такой линзы, что дает возможность получения в некоторых случаях „художественно-мягких“ изображений.

Эти линзы под названием моноклей выпускаются на рынок и в настоящее время. Чтобы несколько ослабить хроматическую aberrацию, фирма Zwiefger в 1920 г. выпустила моноколь из желтого стекла под названием „Пластика“.

Для примера приводим данные наиболее распространенного моноклея в форме, указанной на рис. 79, со следующими оптическими данными: $r_1=15,0$; $r_2=19,7$; $d=2,5$; $n_D=1,52441$.

Кривые ошибок этого объектива указаны на рис. 78.

Значительное уменьшение остаточных aberrаций и некоторое

устранение хроматизма уже возможны в оптической системе, состоящей из двух склеенных линз. В таком объективе мы имеем большее количество элементов для устранения ошибок; следовательно соответствующим подбором радиусов, их комбинаций, толщин и сортов оптического стекла можно свести к минимуму различные ошибки объектива. Если в таком объективе устранена хроматическая aberrация для лучей D и G' , то при небольшой светосиле и малом поле зрения его можно рекомендовать и для киносъемок. Наибольшее распространение эти объективы получили в приборах, служащих для наблюдения (подзорные трубы, бинокли и т. д.).

4. Двухлинзовые объективы

В качестве дешевых ахроматических объективов фирма Герц в 1924 г. выпустила целый ряд двухлинзовых объективов. Приводим данные одного из них по американскому патенту № 1643865, 1924 г.: $r_1=19,65$; $r_2=270,00$; $r_3=35,11$; $d_1=3$; $d_2=1,25$; стекло крон $n=1,5096$; флинт— $1,6173$; отверстие объектива $1:11$. Конструкция объектива и кривые aberrаций представлены на рис. 80.

Подобно вышеописанным герцовским объективам фирма Цейсс-Икон выпустила в большом количестве фотообъективы под названием „Фронтар“ для небольших ручных дешевых камер. Такие объективы со светосилой $1:9$ и $f=80$ мм покрывают с достаточной резкостью формат $4 \times 6,5$ см. Для формата 6×9 светосила „Фронтара“ уменьшена до $1:11$.

Значительного исправления ошибок в двухлинзовом объективе достигли тем, что между первой и второй линзой оставили воздушный промежуток, и таким образом система получилась несклеенная. Таков например тип гауссовского объектива, имеющего сравнительно малый размер ошибок астигматизма и сферической aberrации.

Такого рода объективы расположены в аппарате несколько иначе, чем приведенные ранее; кроме того диафрагма у них вынесена вперед перед объективом.

На рис. 81 приведены кривые aberrации несклеенного двухлинзового фотообъектива фирмы Буш для $f=100$ со следующими оптическими данными:

$r_1=$	10,64	$d_1=$	2,93	$n=$	1,6031
$r_2=$	20,24	$m_1=$	1,57	$n=$	1
$r_3=$	-182,40	$d_2=$	2,73	$n=$	1,4967
$r_4=$	-16,00				

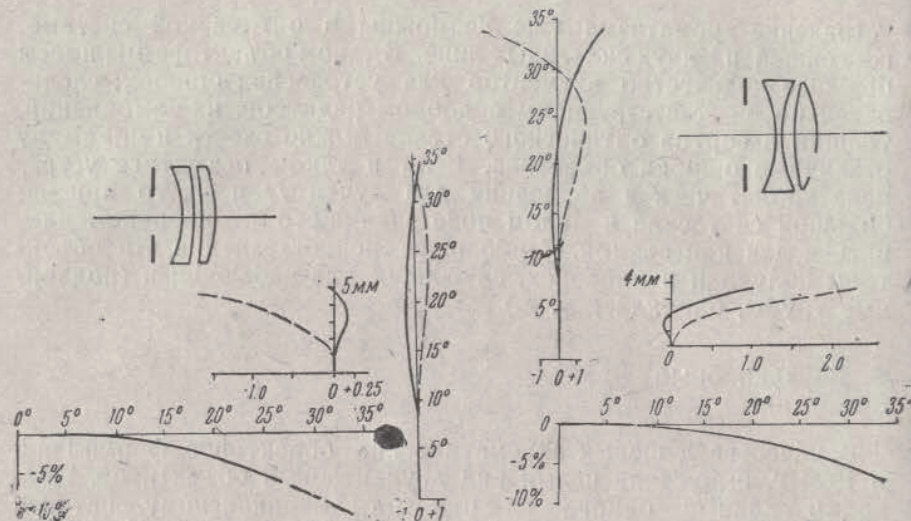


Рис. 81.

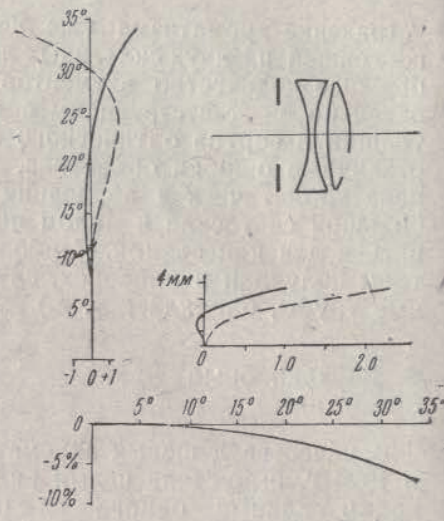


Рис. 82.

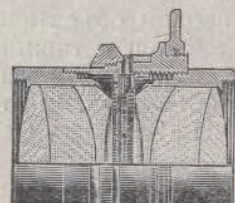


Рис. 83.

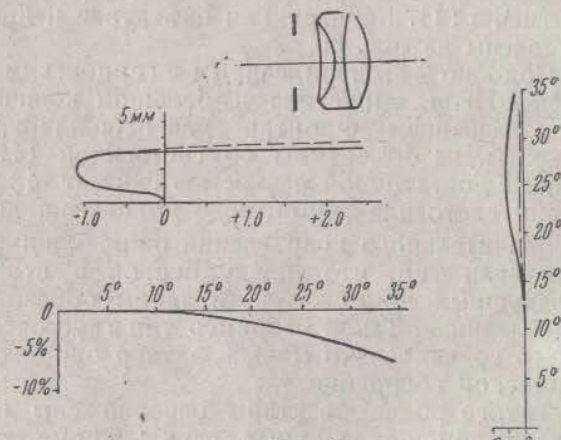


Рис. 84.

Расстояние от диафрагмы до первой поверхности линзы равно 1,80 мм.

Объектив рассчитан для отверстия 1:11.

Помимо двухлинзовых несклеенных фотообъективов менискообразной формы (рис. 81) укажем еще на другую форму двухлинзового несклеенного фотообъектива, состоящего из двояковыгнутой и двояковыпуклой линз. Последний вид объектива

послужил прототипом для изготовления симметричных анастигматов с небольшим полем зрения, состоящих из двух одинаковых несклеенных систем. Такие объективы со средней диафрагмой являются лучшими симметричными четырехлинзовыми фотообъективами, о чем будет сказано ниже.

В качестве образца приводим данные задней половины фотообъектива фирмы Истмен-Кодак как самостоятельного объектива (рис. 82) с $f=100,0$; $r_1=20,45$; $r_2=20,45$; $r_3=37,42$; $r_4=13,47$; $d_1=0,6$; $m_1=0,97$; $d_2=1,2$.

Расстояние от диафрагмы до первой поверхности линзы равняется 1,0. Стекло для флинта $n_D=1,6105$, для крона $n_D=1,5803$.

В нашем обзоре фотообъективов, как это видно из разобранных нами выше, мы идем от изучения простейших объективов к более сложным; останавливаться далее на ознакомлении с объективами относительно простой формы нет надобности, ибо они весьма редко употребляются при киносъемках. Таким образом мы переходим к описанию более сложных систем, состоящих из трех и более линз.

5. Половинки симметричных объективов как самостоятельные фотообъективы

При корригировании (исправлении) оптической системы весьма важно не только количество отдельных линз, но и воздушное пространство между ними, каковое по существу является также линзой с показателем 1,0. Преимущество такой воздушной линзы заключается в том, что, в то время как у обычной стеклянной линзы толщина ее весьма ограничена, у воздушной линзы этот промежуток может быть взят любых размеров. В связи с этим были разработаны и выпущены новые фотообъективы, у которых воздушный промежуток между линзами был настолько значителен, что в него удалось смонтировать диафрагму. Подобные фотообъективы с диафрагмой, установленной в середине оптической системы, имеют значительное преимущество перед объективами с диафрагмой, установленной или перед объективом или позади него, что подробно разбиралось выше в главе IV (см. „Дисторсия“).

Рассмотрим сейчас несколько таких объективов, которые состоят из двух симметричных оптических систем (рис. 83), у которых следовательно передняя или задняя половинки одинаковы и представляют собой комбинацию трех склеенных линз. Между передней и задней системами в так называемой воздушной линзе поставлена диафрагма. Так как в данное время нас интересуют только кривые одной из половинок, то ниже даются оптические данные задней половины симметричного фотообъектива как самостоятельной оптической системы.

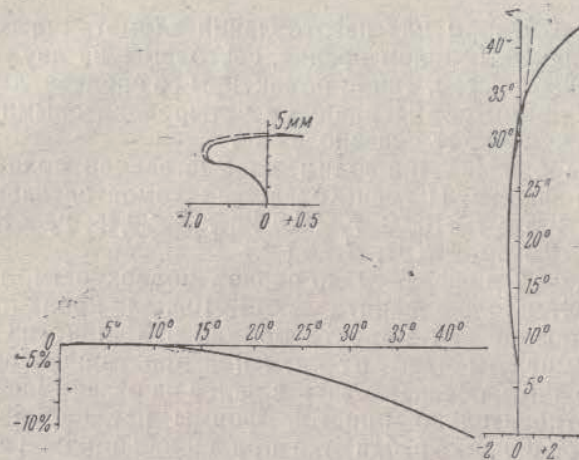


Рис. 85.

Описание же объектива как двойного симметричного анастигмата, составленного из двух подобных друг другу оптических систем, дается несколько дальше.

Прежде всего остановимся на задней линзе объектива Герца „Дагор“, являющейся вполне скорректированной оптической системой, отнесенной на основании представленных здесь кривых к анастигматам.

Объектив этот (рис. 84) рассчитан Хёгом и имеет следующую характеристику:

$r_1 = 11,7$	$d_1 = 1,1$	$n_D = 1,5150$
$r_2 = 4,7$	$d_2 = 0,4$	$n_D = 1,5680$
$r_3 = 12,9$	$d_3 = 1,7$	$n_D = 1,6131$
$r_4 = 10,9$		

Расстояние диафрагмы равно 1,3.

Рис. 85 дает оптическую характеристику и кривые aberrаций задней половинки анастигмата Рудольфа $f = 100,0$, выпущенного фирмой Цейсса в 1910 г.

$r_1 = 13,5$	$d_1 = 1,8$	$n = 1,4585$
$r_2 = 5,8$	$d_2 = 0,7$	$n = 1,4900$
$r_3 = 47,7$	$d_3 = 2,3$	$n = 1,6128$
$r_4 = 14,5$		

Расстояние диафрагмы равно 1,7.

Конструкция объектива тождественна с объективом „Дагор“ Герца.

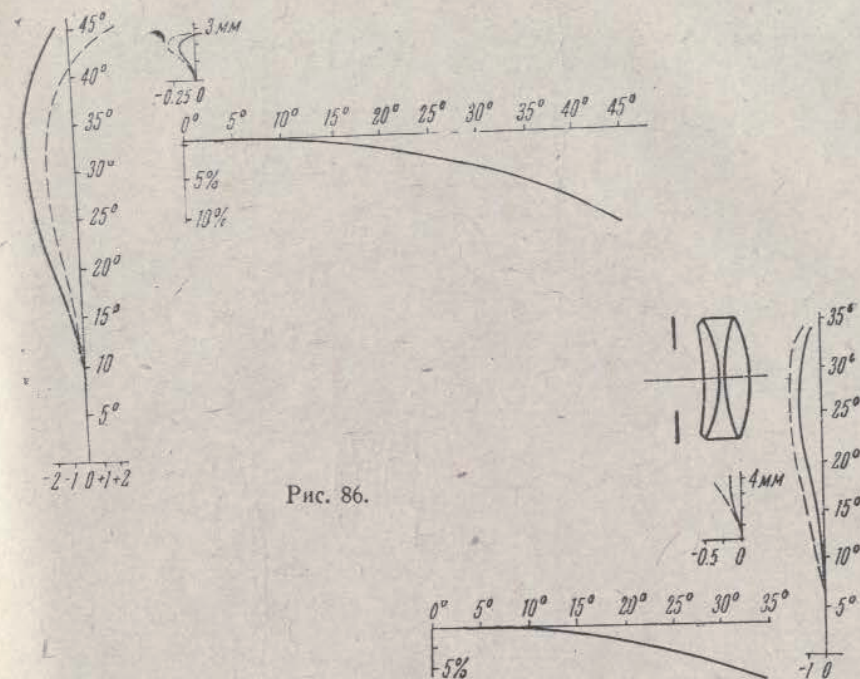


Рис. 86.

Для сравнения с „Дагором“ (рис. 84) даем более поздний объектив этого же типа, рассчитанный Урбаном и выпущенный также фирмой Герца в 1923 г. Его оптические данные следующие:

$r_1 = 13,3$	$d_1 = 0,8$	$n = 1,4634$
$r_2 = 5,7$	$d_2 = 0,5$	$n = 1,5991$
$r_3 = 16,1$	$d_3 = 1,9$	$n = 1,6584$
$r_4 = 11,1$		

Расстояние диафрагмы равно 0,9.

На рис. 86 изображены кривые aberrации этого объектива. Разумеется, при пользовании задней половинкой симметричных анастигматов светосила их не превышает 1:9, причем при наклоне главного луча более чем на 20° изображение делается уже неудовлетворительным.

Чтобы закончить рассмотрение симметричных фотообъективов, у которых задние половинки являются самостоятельными оптическими системами, приведем несколько типов фотообъек-

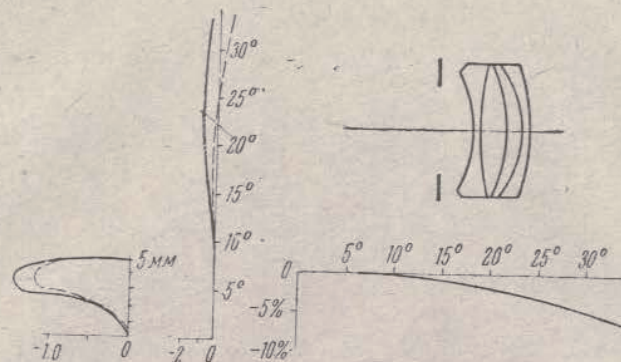


Рис. 88.

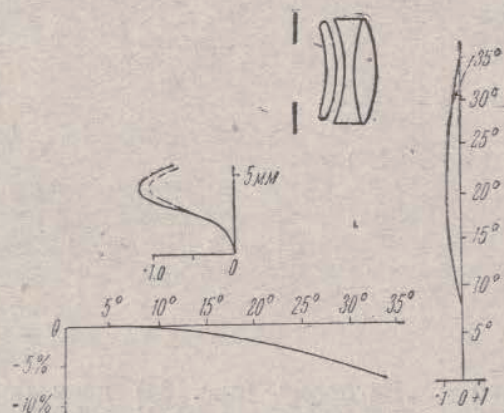


Рис. 89.

тивов, также симметричных, но состоящих не из трех, а из большего количества склеенных линз, и кроме того в некоторых случаях не всегда склеенных.

Двойной анастигмат Е. Буша по расчету Мартина (1902 г.): его задняя половина с оптическими данными и кривыми aberrациями представлена на рис. 87.

$r_1 = 10,4$	$d_1 = 1,5$	$n = 1,6098$
$r_2 = 8,5$	$d_2 = 0,4$	$n = 1,5149$
$r_3 = 16,1$	$m_1 = 0,15$	$n = 1$
$r_4 = 33,8$	$d_3 = 0,4$	$n = 1,5825$
$r_5 = 25,5$	$d_4 = 1,15$	$n = 1,6112$
$r_6 = 16,8$		

Симметричный анастигмат Росса (Лондон) по расчету Стюарта (1913 г.)—оптические данные для задней половинки:

$r_1 = 13,5$	$d_1 = 0,5$	$n = 1,4933$
$r_2 = 45,3$	$d_2 = 2,5$	$n = 1,6093$
$r_3 = 10,0$	$d_3 = 1,2$	$n = 1,5173$
$r_4 = 7,3$	$d_4 = 0,6$	$n = 1,5801$
$r_5 = 14,6$		

Расстояние диафрагмы равно 2,5.

Кривые aberrаций и конструкция задней половины даны на рис. 88.

В 1918 г. Рудольф опубликовал новый симметричный анастигмат, половинка которого и кривые aberrаций представлены на рис. 89. Его оптические данные следующие:

$r_1 = 20,2$	$d_1 = 1,8$	$n = 1,6053$
$r_2 = 14,1$	$m_1 = 0,8$	$n = 1$
$r_3 = 11,3$	$d_2 = 1,5$	$n = 1,5398$
$r_4 = 83,9$	$d_3 = 3,3$	$n = 1,6207$
$r_5 = 16,1$		

Диафрагма на расстоянии, равном 1,4.

Итак нами были рассмотрены отдельные виды двух-, трех- и четырехлинзовых фотообъективов, из которых и составляются двойные симметричные объективы, подробный разбор которых помещен на стр. 93.

6. Трехлинзовые фотообъективы

Крайне простым объективом с диафрагмой между линзами является трехлинзовый объектив, у которого две линзы склеены. Оптические качества этого объектива приближаются к анастигмату (для середины поля зрения); при малых относительных отверстиях он может быть достаточно широкоугольным.

Примером такого объектива служит английский объектив „Альдис“, изображенный на рис. 90. Он представляет собой переднюю ахроматическую склеенную линзу, после которой следует диафрагма, а за ней — задняя собирающая линза.

Для $f = 100$ оптические данные его следующие:

$r_1 = 13,8$	$d_1 = 3,1$	$n = 1,5366$
$r_2 = 17,8$	$d_2 = 2,5$	$n = 1,5738$
$r_3 = 13,0$	$m_1 = 4,3$	$n = 1$
$r_4 = 49,4$	$d_3 = 6,0$	$n = 1,6041$
$r_5 = 1027,0$		

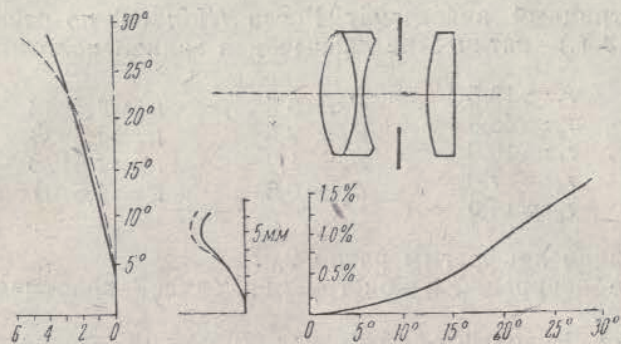


Рис. 90.

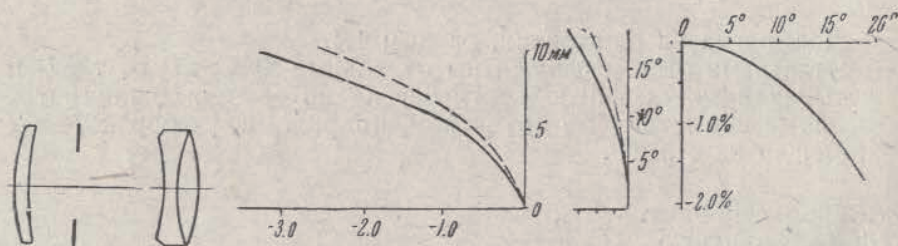


Рис. 91.

Кривые аберраций указаны на рис. 90.

Одинаковым по простоте является объектив Bishop'a (французский патент). Из приведенных на рис. 91 кривых ошибок и оптической схемы можно вывести заключение, что данный объектив пригоден для портретной съемки, но его нельзя причислить к анастигматам.

Приводим его оптические величины для $f = 100$ мм:

$r_1 = 60,9$	$d_1 = 1,8$	$n = 1,5170$
$r_2 = 86,8$	$m_1 = 40,3$	$n = 1$
$r_3 = 300,0$	$d_2 = 1,8$	$n = 1,6260$
$r_4 = 96,0$	$d_3 = 2,7$	$n = 1,5170$
$r_5 = 52,9$		

По оптической конструкции объектив Bishop'a подобен объективу Роденштока — „Пантогональ“, у которого при малой диафрагме можно достичь поля зрения до 120° . При такой диафрагме „Пантогональ“ приближается к известному широкоугольному объективу Герца — „Гипергону“.

На рис. 92 даны оптическая схема и кривые ошибок фотообъектива Роденштока — „Пантогональ“.

Следующая группа трехлинзовых объективов отличается от предыдущей тем, что все три линзы отделены между собой воздушным промежутком. Первая и последняя линзы объектива — собирающие, средняя же линза — рассеивающая.

Изобретателем этой формы объективов является Тейлор. Выпустив в 1894 г. первый триплет под названием „Кук-линзы“, Тейлор в дальнейшем дал множество вариантов этого типа объектива.

Оптическая схема триплета благодаря своей особой гибкости дает возможность значительно уменьшить ошибки объектива, ввиду чего фотообъектив Тейлора является в настоящее время наиболее распространенной формой объективов. Весьма простое его устройство при высоком оптическом качестве вызвало многочисленные подражания различных фабрик.

Трехлинзовый анастигмат Тейлора пригоден для любых целей. На основе его оптической схемы выпущен целый ряд объективов, начиная со светосильных универсальных объективов и кончая объективами для аэрофотосъемки. Он особенно ценен для киносъемок, так как относительно небольшой угол поля зрения дает резкое и плоское изображение. Как широкоугольный объектив он мало использован даже и при малых диафрагмах, тем не менее Тейлором был выпущен репродукционный объектив „Кук-анастигмат“ при отверстии 1:8.

Фирма Цейсса по расчету Кёнига выпустила большое количество объективов типа триплет для астрономической фотографии, следовательно больших фокусных расстояний. Отметим наиболее распространенные фотообъективы трехлинзовой конструкции по Тейлору, выпущенные разными фирмами: Буш — „Глукар“, анастигмат 1:3,1 и 1:6,3; Герц — „Гипар“ и „Тенаксиар“ 1:6,8; Краусс — „Трианар“ 1:3,1 и 1:4,5; Мейер — „Триоплан“ 1:3,0 и 1:6,3; Роденшток — „Евригон“ и „Трикар“; „Штейнгель“ — „Кассар“; Цейсс — „Триотар“; Фохтлендер — „Войхтар“ и т. д.

Ниже даются несколько оптических схем трехлинзовых несклеенных объективов, оптические величины и кривые аберраций.

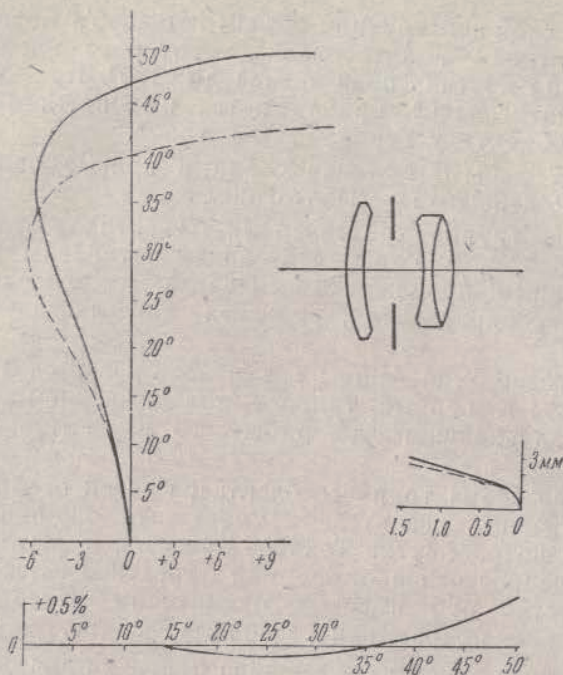


Рис. 92.

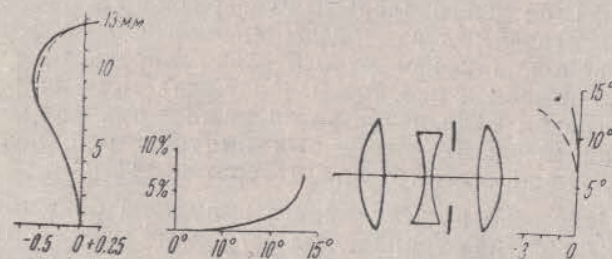


Рис. 93.

1. Оригинал триплета Тейлора 1893 г. Оптические данные:

$r_1 = 26,4$	$d_1 = 5,9$	$n = 1,5108$
$r_2 = 150,7$	$m_1 = 10,9$	$n = 1$
$r_3 = 29,8$	$d_2 = 0,2$	$n = 1,6042$
$r_4 = 24,2$	$m_2 = 12,5$	$n = 1$
$r_5 = 150,7$	$d_3 = 5,9$	$n = 1,5108$
$r_6 = 26,4$		

Как видно из оптических данных, в оригинале триплета Тейлора передняя и задняя собирательные линзы симметричны. Схема и кривые ошибок даны на рис. 93.

2. Весьма оригинально решена конструкция триплета фирмой Бек (Лондон). Выпущенный ею в 1912 г. трехлинзовый анастигмат был изготовлен из стекол, очень схожих между собой по n_D .

Его оптические данные таковы:

$r_1 = 31,7$	$d_1 = 2,9$	$n = 1,612$
$r_2 = \infty$	$m_1 = 10,8$	$n = 1$
$r_3 = 40,0$	$d_2 = 2,9$	$n = 1,618$
$r_4 = 38,5$	$m_2 = 6,1$	$n = 1$
$r_5 = 462,0$	$d_3 = 2,9$	$n = 1,612$
$r_6 = 31,0$		

Диафрагма объектива расположена между первой и второй линзами, что тоже не совсем обычно для этого типа объектива. Схема и кривые aberrаций — на рис. 94.

3. Триплет Цейсса по расчету Вандерслеба дает очень малую дисторсию для сравнительно большого угла. Объектив был выпущен фирмой в 1913 г.

$r_1 = 16,8$	$d_1 = 3,5$	$n = 1,6113$
$r_2 = 116,9$	$m_1 = 1,0$	$n = 1$
$r_3 = 56,3$	$d_2 = 0,5$	$n = 1,5488$
$r_4 = 15,4$	$m_2 = 10,3$	$n = 1$
$r_5 = \infty$	$d_3 = 2,1$	$n = 1,6113$
$r_6 = 61,3$		

Первая и третья линзы изготовлены из тяжелого крона, средняя — рассеивающая линза из легкого флинта. Кривые aberrаций показаны на рис. 95.

4. Фирма Герца в 1921 г. выпустила свой трехлинзовый фотообъектив в так называемой полной симметричной конструкции.

У него не только первая и третья линзы одинаковы, но и средняя рассеивающая линза представляет собой двояковогнутую линзу одинаковых радиусов.

$r_1 = 32,4$	$d_1 = 3,4$	$n = 1,5690$
$r_2 = 301,4$	$m_1 = 10,7$	$n = 1$
$r_3 = 37,8$	$d_2 = 1,1$	$n = 1,6364$
$r_4 = 37,8$	$m_2 = 10,7$	$n = 1$
$r_5 = 301,4$	$d_3 = 3,4$	$n = 1,5690$
$r_6 = 32,4$		

Схема и aberrации представлены на рис. 96.

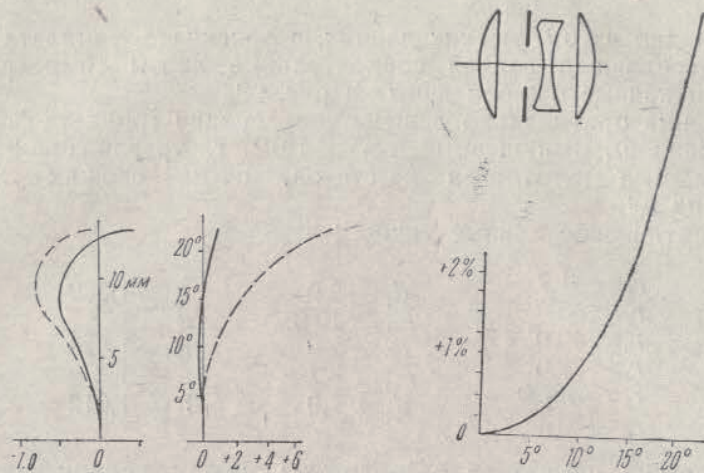


Рис. 94.

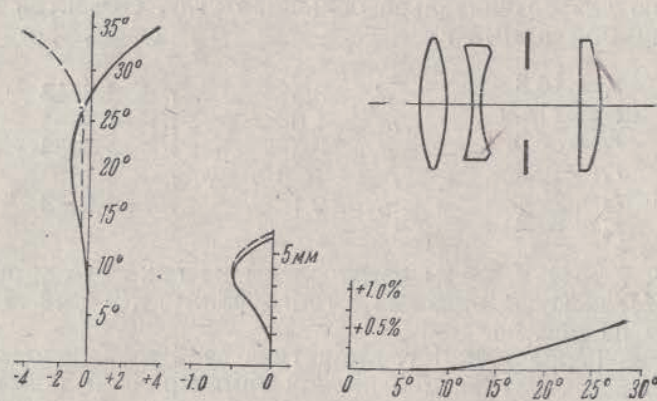


Рис. 95.

7. Дальнейшее развитие трехлинзового объектива

Как было указано выше, фотообъектив Тейлора при высоких, своих качествах все же имел ряд недостатков, заключающихся в небольшом поле зрения, его кривизне и хроматической разности сферических aberrаций. Следовательно усовершенствование такого объектива было возможно только путем некоторого

его усложнения, оставляя принципиальную оптическую схему Тейлора без изменения.

Первым, улучшившим тип трехлинзового объектива Тейлора, был Рудольф, научный сотрудник фирмы Цейсса. Усовершенствование фотообъектива произошло за счет изменения конструкции задней линзы. Такой объектив был назван фирмой Цейсса „Тессаром“ и состоял из двух наружных собирающих линз и двух внутренних рассеивающих; последние две линзы были склеены, так что его оптическая схема (рис. 98) весьма сходна с фотообъективом Тейлора.

Анастигмат „Тессар“ принадлежит к универсальным фотообъективам и считается одним из лучших фотообъективов. Первый расчет оптики „Тессара“ был опубликован фирмой Цейсса в 1902 г. (патент № 142294), причем литературные материалы, собранные Мерте, указывают, что путь Рудольфа к „Тессару“ шел не от триплета Тейлора, а от более старого анастигмата Рудольфа под названием „Унар“.

„Тессар“ 1902 г. был скорректирован Рудольфом для отверстия 1:5,6; при достаточно хороших кривых ошибок в отношении сферической aberrации и условия синусов объектив все же обладал погрешностью кривизны поля и астigmaticкой разностью. Вследствие этого „Тессар“ 1902 г. выпущен в продажу не был, но две другие формы, выработанные из этого первого объектива, а именно „Тессар“ 1:6,3 (схема и кривые — рис. 99) и репродукционный объектив, в которых были устранены все ошибки первого варианта, получили широкое распространение.

Дальнейшее развитие „Тессара“ шло в направлении увеличения светосилы как универсального фотообъектива; при этом вычислительную работу кроме Рудольфа ведут Мерте и Вандерслеб. Таким образом в разное время фирма Цейсса выпустила серию „Тессаров“ для различных целей со светосилой от 1:9 до 1:2,7. „Тессар“ с отверстием 1:9 выпускался как широкоугольный с полем зрения до 80°, но, как и тейлоровский широкоугольный объектив, он был мало распространен.

Следует отметить еще один хороший анастигмат, представляющий собой видоизменение Тейлора, рассчитанный Гартингом и выпущенный фирмой „Фохтлендер“.

Этот объектив в отличие от „Тессара“ имеет и переднюю линзу, склеенную из двух стекол (рис. 102). Несколько иную конструкцию другого фотообъектива Фохтлендера представляет объектив „Динар“ (рис. 97), незначительно уступающий „Гелнару“.

Английская фирма Росс выпустила в 1913 г. анастигмат, сходный с „Тессаром“, но отличный от последнего тем, что задняя линза у него склеена из трех стекол (рис. 103).

В 1925 г. фирма Цейсса по вычислению Мерте выпустила

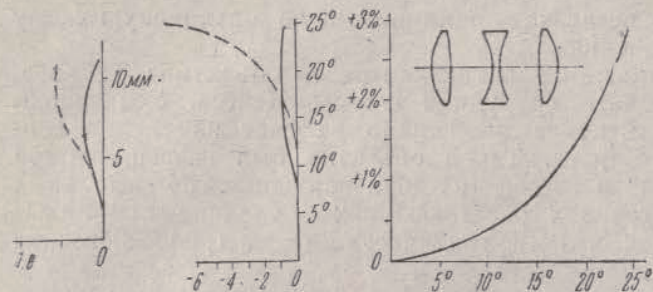


Рис. 96.

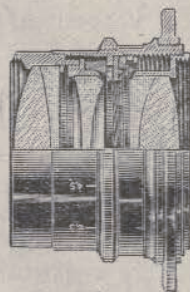


Рис. 97.

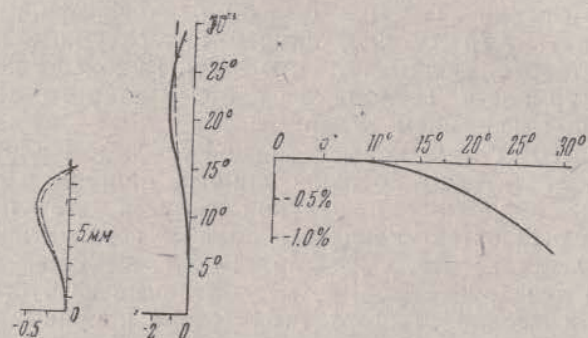


Рис. 98.

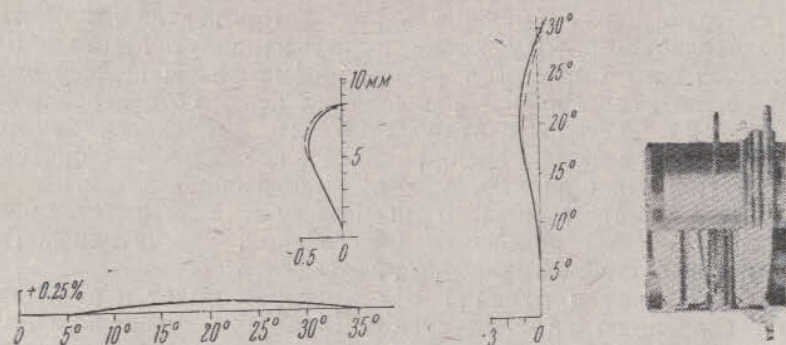


Рис. 99.

измененный „Тессар“ под названием „Биотессар“. Этот тип объектива с отверстием 1:2,8 (рис. 104) был предназначен для кино-съемок, так как при относительно небольшом поле зрения в 40° имел лучшую резкость, чем „Тессар“ (1:2,7).

Необходимо отметить, что усовершенствованные фотообъективы Тейлора являются лучшими объективами для киносъемок. Ниже даем оптические данные, схемы и кривые aberrаций для некоторых наиболее распространенных фотообъективов указанной группы:

1. Объектив „Тессар“ Цейсса по расчету Рудольфа (рис. 98) 1902 г., как первая попытка усовершенствовать объектив Тейлора (объектив в продажу выпущен не был):

$r_1 = 21,5$	$d_1 = 3,3$	$n = 1,6113$
$r_2 = \infty$	$m_1 = 1,9$	$n = 1$
$r_3 = 74,2$	$d_2 = 1,1$	$n = 1,6046$
$r_4 = 20,8$	$m_2 = 6,0$	$n = 1$
$r_5 = 111,3$	$d_3 = 1,1$	$n = 1,5211$
$r_6 = 25,2$	$d_4 = 3,0$	$n = 1,6113$
$r_7 = 36,7$		

2. Улучшенный „Тессар“ Рудольфа, который был изготовлен и выпущен в продажу фирмой Цейсса:

$r_1 = 20,1$	$d_1 = 3,1$	$n = 1,6116$
$r_2 = \infty$	$m_1 = 1,7$	$n = 1$
$r_3 = 66,0$	$d_2 = 1,0$	$n = 1,5831$
$r_4 = 18,8$	$m_2 = 4,3$	$n = 1$
$r_5 = 81,1$	$d_3 = 1,0$	$n = 1,5234$
$r_6 = 20,3$	$d_4 = 3,1$	$n = 1,6073$
$r_7 = 33,6$		

Кривые aberrаций этого объектива даны на рис. 99.

3. „Тессар“ по расчету Вандерслеба (рис. 100) фирмы Цейсса с отверстием 1:4,5:

$r_1 = 26,3$	$d_1 = 3,7$	$n = 1,6134$
$r_2 = \infty$	$m_1 = 4,0$	$n = 1$
$r_3 = 58,1$	$d_2 = 1,7$	$n = 1,5739$
$r_4 = 23,9$	$m_2 = 5,3$	$n = 1$
$r_5 = 146,7$	$d_3 = 1,7$	$n = 1,5300$
$r_6 = 22,3$	$d_4 = 4,6$	$n = 1,6145$
$r_7 = 36,3$		

4. Новый „Тессар“ Цейсса 1:3,5 по расчету Мерте 1926 г.:

$r_1 = 32,08$	$d_1 = 4,63$	$n = 1,60717$
$r_2 = \infty$	$m_1 = 5,42$	$n = 1$
$r_3 = 71,13$	$d_2 = 3,75$	$n = 1,57596$
$r_4 = 28,85$	$m_2 = 6,71$	$n = 1$
$r_5 = \infty$	$d_3 = 1,50$	$n = 1,52648$
$r_6 = 28,50$	$d_4 = 8,0$	$n = 1,62377$
$r_7 = 47,22$		

Схема и кривые aberrаций — на рис. 101.

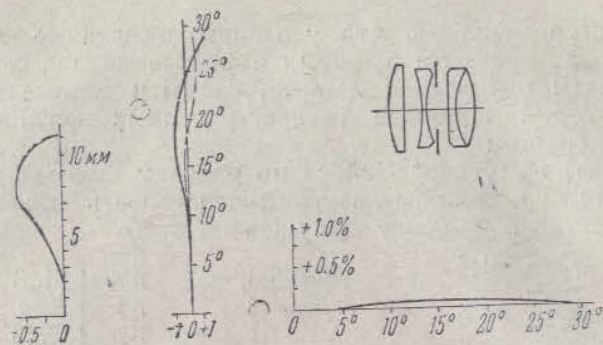


Рис. 100.

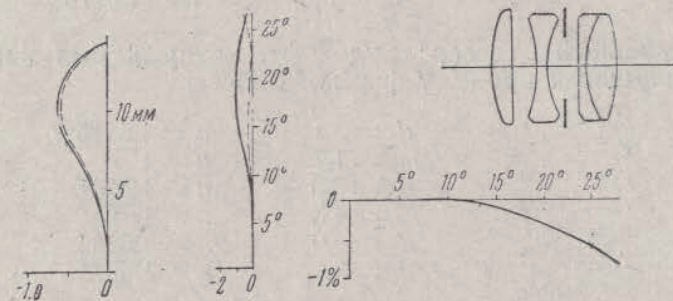


Рис. 101.

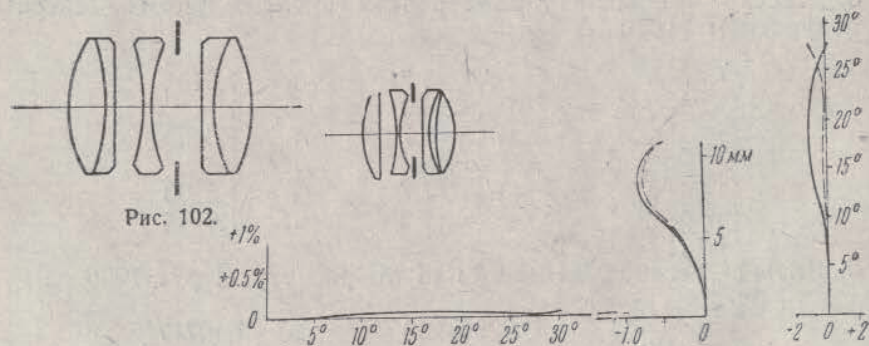


Рис. 102.

Рис. 103.

5. Анастигмат Фохтлендера „Гелиар“, отверстие 1:4,5, поле зрения 55° (рис. 102) дает отчетливый резкий рисунок; рекомендуется для киносъемок.

6. Анастигмат Росса (рис. 103), по вычислению Стюарта, 1913 г. напоминает „Тессар“ Цейсса, но усложнен дополнительной линзой задней системы объектива. Светосила 1:4,5; объектив очень хорошо корригирован в отношении дисторсии.

$r_1 = 23,6$	$d_1 = 3,7$	$n = 1,5725$
$r_2 = \infty$	$m_1 = 3,9$	$n = 1$
$r_3 = 64,2$	$d_2 = 1,2$	$n = 1,5784$
$r_4 = 22,7$	$m_2 = 4,9$	$n = 1$
$r_5 = 232,0$	$d_3 = 1,8$	$n = 1,5199$
$r_6 = 17,6$	$d_4 = 1,9$	$n = 1,5394$
$r_7 = 31,8$	$d_5 = 3,7$	$n = 1,6120$
$r_8 = 39,5$		

7. „Биотессар“ Цейсса 1:2,8, по вычислению Мерте 1925 г. (рис. 104) предназначен для киносъемок. Дает резкое изображение по всему полю зрения.

$r_1 = 38,2$	$d_1 = 8,5$	$n = 1,6238$
$r_2 = 68,9$	$d_2 = 0,6$	$n = 1,5475$
$r_3 = 1369,7$	$m_1 = 6,87$	$n = 1$
$r_4 = 60,6$	$d_3 = 6,5$	$n = 1,5829$
$r_5 = 28,6$	$m_2 = 4,5$	$n = 1$
$r_6 = \infty$	$d_4 = 2,7$	$n = 1,6424$
$r_7 = 61,7$	$d_5 = 0,7$	$n = 1,5399$
$r_8 = 23,6$	$d_6 = 9,8$	$n = 1,6221$
$r_9 = 45,1$		

8. Двойные фотообъективы

Наряду с усовершенствованием фотообъективов путем конструирования новых форм с увеличением количества отдельных линз применялось и дублирование отдельных оптических систем в самостоятельный фотообъектив.

Такой фотообъектив, состоящий из двух оптических систем, имел значительное преимущество в большей светосиле и лучшей коррекции. По своей конструкции двойные фотообъективы распадаются на:

1) объективы, состоящие из двух одинаковых оптических систем, обращенных симметрично к диафрагме, называемые двойными симметричными объективами;

2) объективы, состоящие из двух геометрически подобных оптических систем различных фокусов и имеющих диафрагмы между первой и второй системами; такие объективы названы двойными полусимметричными фотообъективами;

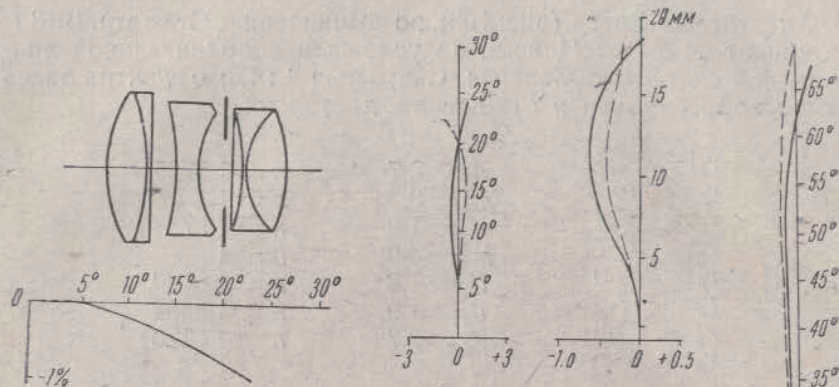


Рис. 104.

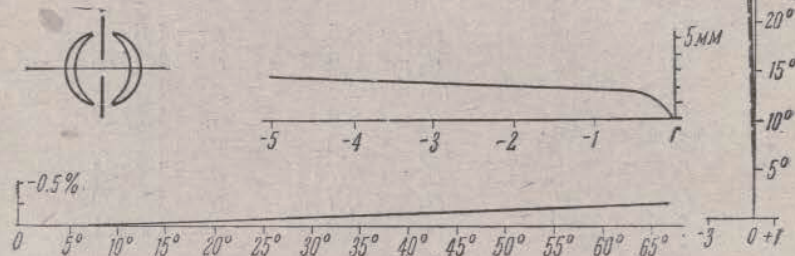


Рис. 105.

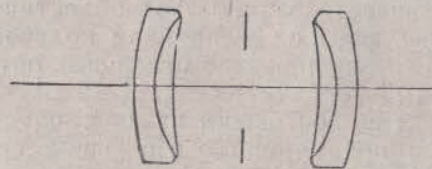


Рис. 106.

3) объективы, состоящие из двух оптических систем и несходные друг с другом. Симметричные объективы были выпущены в довольно ранний период. А. Штейнгель в 1865 г. сконструировал фотообъектив из двух симметричных менисков и предназначил его преимущественно для широкоугольных съемок.

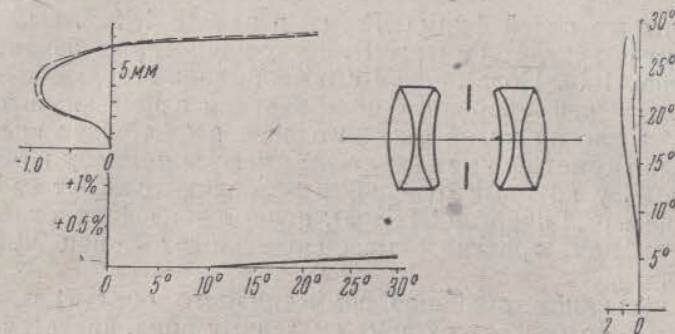


Рис. 107.

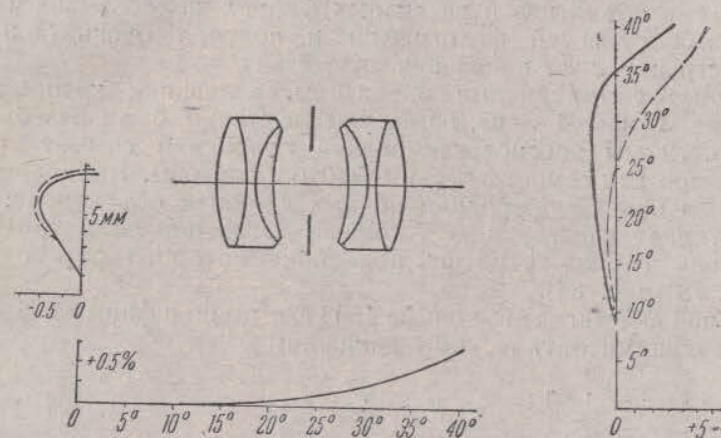


Рис. 108.

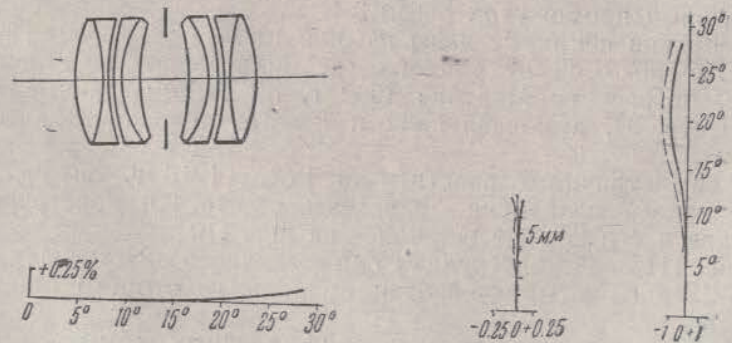


Рис. 109.

Для этих же целей фирма Герца в начале XX в. выпустила в продажу объектив „Гипергон“, состоящий также из двух менисков (рис. 105). Поле зрения его необычайно большое — 140°; хотя сферическая aberrация и хроматизм в нем значительны, все же для многих целей он пригоден и в настоящее время.

Двойные симметричные объективы имеют четырех конструкций: первые, у которых отдельные половинки состоят из одной линзы (пример „Гипергон“ Герца), вторые — из двух склеенных линз, потом идут трехлинзовые половинки и наконец четырехлинзовые.

Родоначальником двойного симметричного объектива, половинки которого состоят из двух склеенных линз, является апланат Штейнгеля (рис. 106).

Этот тип объектива в различных формах вырабатывался для отдельных областей фотографии и получил очень большое распространение до появления анастигматов.

Двойные симметричные объективы, половинки которых состоят из 3 или 4 линз, нами уже частично были разобраны. На стр. 79 мы рассмотрели задние половинки симметричных объективов как самостоятельные фотообъективы. Приводим для сравнения кривые aberrаций полных двойных объективов; так рис. 107 дает конструкцию и кривые aberrаций симметричного объектива Герца — „Дагор“, половинка которого рассмотрена на стр. 78 (рис. 84).

Двойной анастигмат Рудольфа 1906 г. выпущен фирмой Цейсса со следующими оптическими данными:

$r_1 = r_8 = 14,6$	$d_1 = d_6 = 2,1$	$n = 1,6128$
$r_2 = r_7 = 37,9$	$d_2 = d_5 = 0,7$	$n = 1,5329$
$r_3 = r_6 = 5,9$	$d_3 = d_4 = 1,8$	$n = 1,4967$
$r_4 = r_5 = 15,4$		

Воздушный промежуток равен 3,4.

Конструкция и кривые даны на рис. 108.

Для двойного симметричного восьмилинзового анастигмата Е. Буша по расчету Мартина 1902 г. оптические данные указаны на стр. 82, а конструкция и кривые aberrаций даны на рис. 109.

Для симметричного анастигмата Росса 1913 г. оптические данные задней половинки приведены на стр. 83, конструкция объектива и его кривые ошибок — на рис. 110.

На рис. 111 дана конструкция симметричного анастигмата Рудольфа 1918 г., четырехлинзовая половинка которого описана на стр. 83.

При сравнении кривых aberrаций двойных симметричных объективов с отдельными их половинками определенно сказы-

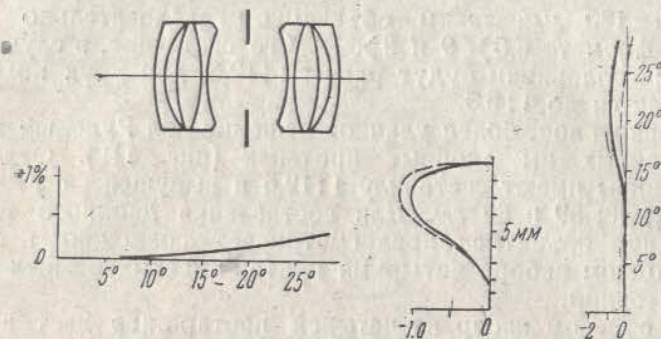


Рис. 110.

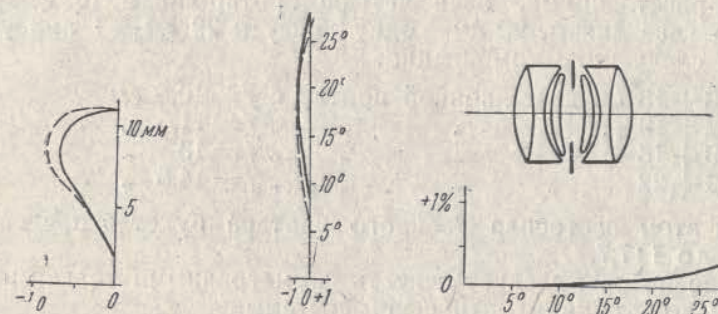


Рис. 111.

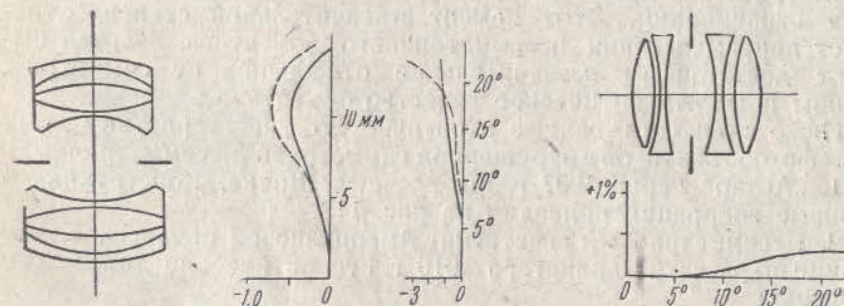


Рис. 112.

Рис. 113.

вается преимущество первых, дающих лучшие кривые aberrаций для большей светосилы.

В строго симметричных объективах мы по существу имеем всего лишь две комбинации фокусных расстояний. Так у объектива Дагор с $f=105$ мм отдельные его половинки будут

равны $f=180$ мм; таким объективом следовательно можно снять на формате $6,5 \times 9$ и 9×12 . Его светосила, в случае если отдельные половинки будут равны 1:12,5, для двух половинок увеличивается до 1:6,3.

Несколько иное, более удачное решение дал Рудольф в сконструированных им двойных протарах (рис. 112). Отдельные протар-линзы имеют светосилу 1:12,5 и выпущены с $f=18$; 22; 29; 35; 41; 48; 59 и 69 см. Для составления двойного протара конструкция объектива предусматривает возможность пользования в одном наборе четырьмя протар-линзами разных фокусных расстояний.

Таким образом набор из четырех протар-линз дает возможность получения двойных протаров с четырьмя разными фокусными расстояниями. Взяв четыре протар-линзы (с фокусами 18 см — две линзы, 22 см — одну линзу и 29 см — 1 линзу), получим следующие комбинации:

1. 18 + 18 см даст двойной протар с $f=10,5$ см
2. 22 + 18 " " " " " $f=11,5$ "
3. 29 + 18 " " " " " $f=13$ "
4. 29 + 22 " " " " " $f=14,5$ "

При этом светосила двойного протара будет в пределах от 1:6,3 до 1:7,7.

Такие наборы следует считать симметричными только в отношении конструкции оптической системы.

Очевидно, строгая симметрия двойного объектива, или его геометрическая подобность, ставит перед вычислителем целый ряд ограничений. Этот момент в значительной степени отпадает при вычислении несимметричного объектива. Иногда бывает достаточным незначительное отклонение от симметрии, чтобы повысить оптическое качество объектива.

Ниже приводим данные и оптическую характеристику двойных фотообъективов с нарушенной симметрией (несимметричных).

1. „Артар“ Герца 1907 г. по расчету Шокке. Конструкция и кривые aberrаций приводим на рис. 113.

2. Несимметричный анастигмат Американской оптической компании по расчету Цвилингера 1916 г. Его оптические данные следующие:

$r_1=27,7$	$d_1=4,2$	$n=1,6141$
$r_2=103,1$	$m_1=1,8$	$n=1$
$r_3=53,9$	$d_2=1,6$	$n=1,5689$
$r_4=37,7$	$m_2=5,4$	$n=1$
$r_5=63,3$	$d_3=1,6$	$n=1,5482$
$r_6=35,1$	$m_3=1,8$	$n=1$
$r_7=53,2$	$d_4=3,6$	$n=1,6141$
$r_8=35,7$		

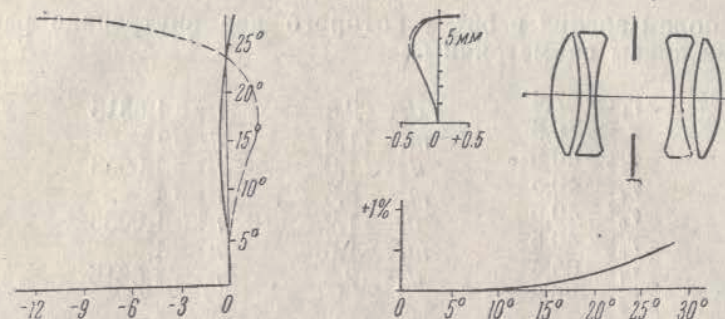


Рис. 114.

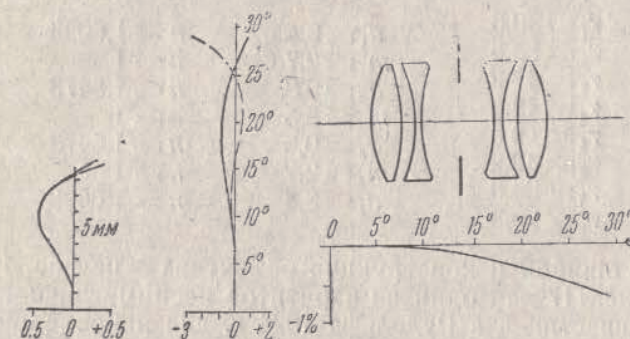


Рис. 115.

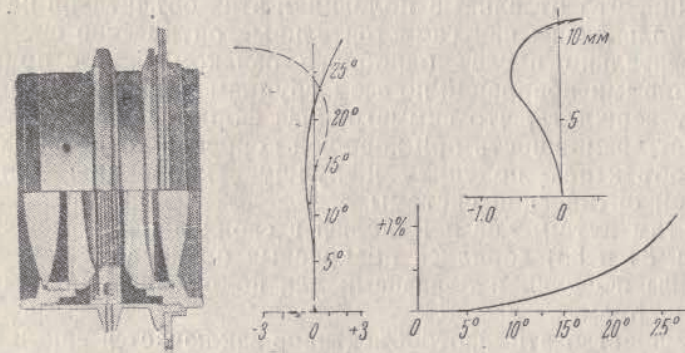


Рис. 116.

Конструкция объектива и кривые ошибок — на рис. 114.

3. Фирма „И. Кодак“ выпустила в 1916 г. интересный объек-

тив с полем зрения в 58° , у которого две внутренние рассеивающие линзы симметричны.

$r_1 = 27,4$	$d_1 = 2,8$	$n = 1,6315$
$r_2 = 76,8$	$m_1 = 1,6$	$n = 1$
$r_3 = 40,5$	$d_2 = 1,0$	$n = 1,6053$
$r_4 = 40,5$	$m_2 = 3,6$	$n = 1$
$r_5 = 40,5$	$d_3 = 1,2$	$n = 1,6053$
$r_6 = 40,5$	$m_3 = 1,6$	$n = 1$
$r_7 = 66,4$	$d_4 = 2,8$	$n = 1,6315$
$r_8 = 25,3$		

Оптическая схема и кривые — на рис. 115.

4. Анастигмат Роденштона выпуска 1921 г.

$r_1 = 30,6$	$d_1 = 3,4$	$n = 1,6098$
$r_2 = 83,5$	$m_1 = 2,7$	$n = 1$
$r_3 = 42,2$	$d_2 = 0,8$	$n = 1,5473$
$r_4 = 49,5$	$m_2 = 5,5$	$n = 1$
$r_5 = 49,5$	$d_3 = 0,8$	$n = 1,5473$
$r_6 = 42,2$	$m_3 = 2,7$	$n = 1$
$r_7 = 94,8$	$d_4 = 3,4$	$n = 1,6098$
$r_8 = 29,3$		

Кривые ошибок и конструкция объектива — на рис. 116.

5. На рис. 117 дан один из вариантов несимметричного светосильного анастигмата Рудольфа 1924 г. для киносъемок. Вышеуказанная группа несимметричных объективов, как мы упоминали раньше, уступает симметричным фотообъективам в том отношении, что отдельные половинки этих объективов не могут быть использованы как самостоятельные оптические системы.

Следовательно после подробного ознакомления с приведенными кривыми aberrаций по всем группам двойных объективов можно утверждать, что симметричная форма двойного анастигмата дает возможность при хорошей коррекции отдельных половинок объектива получить и лучшую коррекцию для всей сдвоенной оптической системы.

Идя этим путем, Хёг и Рудольф в своих двойных анастигматах (рис. 84 и 85) добились прекрасных оптических качеств; их объективы послужили образцами для подражания многим оптическим фирмам.

Преимущество этих фотообъективов заключается еще и в том, что вследствие своей конструкции они имеют всего лишь четыре поверхности, соприкасающихся с воздухом. Такое положение линз уменьшает потерю света при прохождении его через отдельные поверхности, ограниченные воздухом (об этом подробнее изложено ниже), и кроме того дает возможность луч-

шей центровки всей оптической системы, что уменьшает количество так называемых бликов. Напомним также и о большом угле поля зрения таких объективов, достигающем у „Дагора“ отв. 1:9 до 100° .

9. Объективы наибольшей светосилы

Стремление к большей светосиле фотообъективов в середине XIX в. следует объяснить исключительно малой чувствительностью фотопластинок того времени. В этом направлении Петцваль сделал полный переворот в практической фотографии выпуском своего портретного объектива со светосилой 1:3,4. Объективы этой конструкции и в настоящее время еще пользуются успехом в портретной съемке. Кривые aberrаций петцвальского объектива, представленные на рис. 118, дают характеристику его высоких оптических качеств.

Разумеется, петцвальские объективы вследствие своего небольшого угла поля зрения не могли претендовать на универсальность. С выпуском в Германии в 1881 г. новых сортов оптических стекол и с усовершенствованием вычислительной техники к концу XIX в. мы имели уже объективы, достаточно светосильные и для угла больше 50° .

К этому же времени успехи фотохимической промышленности разрешили выпуск более светочувствительной эмульсии, так что объективы со светосилой 1:4,5 считались достаточно светосильными для съемок в любых условиях освещения. Такое положение оставалось без изменения примерно до 1918 г. Начиная с этого времени, успехи кинематографии в области технической и научной съемки требовали более короткой экспозиции, что вызвало, несмотря на высокую чувствительность киноплёнки, создание более светосильных объективов. Ввиду того, что обычно для киносъемок употребляются объективы малых фокусных расстояний, решение конструкции объективов с большими отверстиями не представляло особых усилий в отношении сохранения отчетливости и глубины.

Это конечно не говорит еще о легкости вычисления светосильных объективов даже и для небольших фокусных расстояний. Наоборот, мы имеем целый ряд примеров проверки таких объективов, у которых коррекция крайних зон и ошибки широких пучков были настолько велики, что не давали практической возможности пользоваться этими объективами при полной диафрагме. Вследствие этого вычисление светосильных объективов при сохранении нормальных величин остаточных aberrаций основано было на элементах пропорционального нарастания коррекции у отдельных линз объектива. На основании изложен-

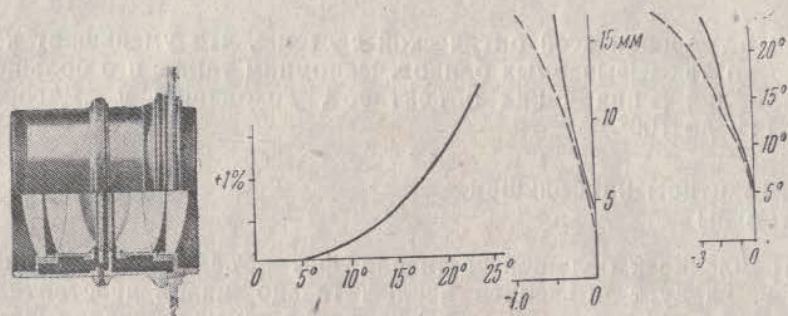


Рис. 117.

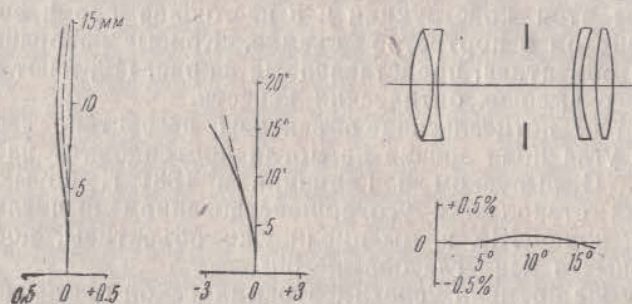


Рис. 118.

ного в основу вычисления светосильных объективов были положены три типа исходных объективов, а именно: объектив Петцваля, триплет Тейлора и линза Гаусса.

1. Рассмотрим сначала очень светосильный объектив Цейсса — „Биотар“ 1:1,8, вычисленный Рором и представляющий собою видоизменение объектива Петцваля. Следует упомянуть, что этот объектив был самым первым сверхсветосильным объективом, так как он был вычислен Рором в 1911 г.

$r_1 = 63,1$	$d_1 = 12,9$	$n = 1,5158$
$r_2 = 132,0$	$m_1 = 2,9$	$n = 1$
$r_3 = 93,8$	$d_2 = 3,7$	$n = 1,7154$
$r_4 = 371,4$	$m_2 = 27,2$	$n = 1$
$r_5 = 58,8$	$d_3 = 3,7$	$n = 1,7154$
$r_6 = 42,4$	$m_3 = 6,6$	$n = 1$
$r_7 = 75,7$	$d_4 = 12,9$	$n = 1,5158$
$r_8 = 176,5$	$m_4 = 52,1$	$n = 1$
$r_9 = 27,2$	$d_5 = 1,9$	$n = 1,5163$
$r_{10} = 1103,0$		

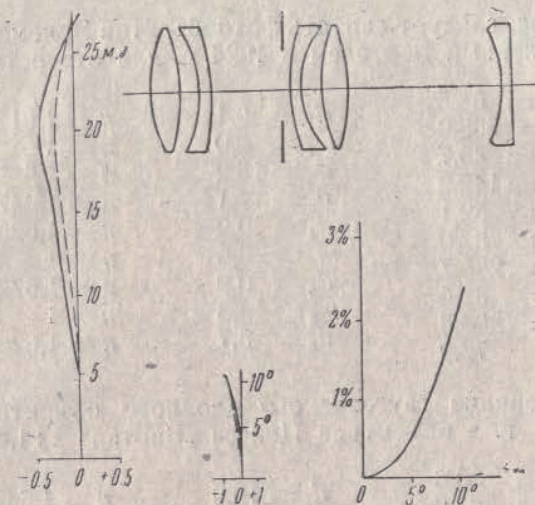


Рис. 119.

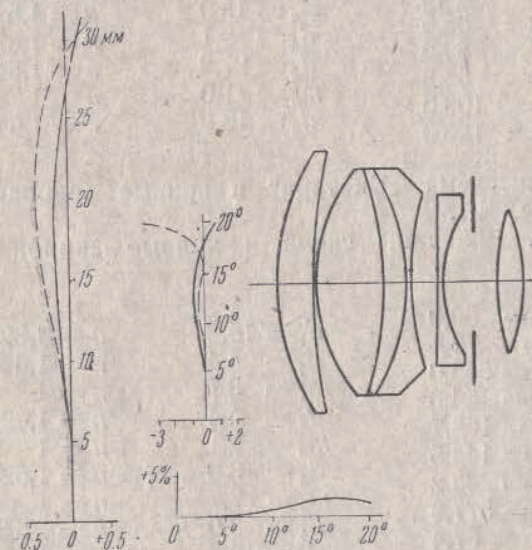


Рис. 120.

Его схема и кривые ошибок — на рис. 119.

2. Вторым объективом (рис. 120), построенным на схеме три-

плета Тейлора, следует считать фотообъектив Эрнемана — „Эрностар“, вычисленный Бертелем в 1924 г. для отверстия 1:1,8.

$r_1 = 68,5$	$d_1 = 9,1$	$n = 1,6127$
$r_2 = 585,9$	$m_1 = 0,0$	$n = 1$
$r_3 = 45,7$	$d_2 = 16,2$	$n = 1,5638$
$r_4 = 142,9$	$d_3 = 7,1$	$n = 1,6477$
$r_5 = 52,1$	$d_4 = 0,9$	$n = 1,6261$
$r_6 = 82,0$	$m_2 = 6,5$	$n = 1$
$r_7 = 285,7$	$d_5 = 0,9$	$n = 1,6727$
$r_8 = 32,4$	$m_3 = 14,3$	$n = 1$
$r_9 = 83,8$	$d_6 = 5,7$	$n = 1,6223$
$r_{10} = 72,9$		

3. Видоизменение гауссовского двойного объектива сделано Мерте в 1927 г. в объективе Цейсса „Биотар“ 1:1,4.

$r_1 = 83,6$	$d_1 = 10,8$	$n = 1,6424$
$r_2 = 321,0$	$m_1 = 1,7$	$n = 1$
$r_3 = 44,8$	$d_2 = 15,6$	$n = 1,6231$
$r_4 = 1150,0$	$d_3 = 5,1$	$n = 1,5757$
$r_5 = 28,3$	$m_2 = 18,9$	$n = 1,5$
$r_6 = 38,5$	$d_4 = 5,1$	$n = 1,6727$
$r_7 = 50,5$	$d_5 = 21,2$	$n = 1,6424$
$r_8 = 53,2$	$m_3 = 1,0$	$n = 1$
$r_9 = 106,0$	$d_6 = 13,9$	$n = 1,6424$
$r_{10} = 120,0$		

Оптическая схема „Биотара“ и кривые aberrаций представлены на рис. 121.

4. На рис. 122 даны схема и кривые „киноплазмата“ Рудольфа 1:2.

$r_1 = 59,0$	$d_1 = 15,3$	$n = 1,6218$
$r_2 = 76,4$	$d_2 = 4,4$	$n = 1,6463$
$r_3 = 655,0$	$m_1 = 8,7$	$n = 1$
$r_4 = 54,6$	$d_3 = 4,4$	$n = 1,6260$
$r_5 = 163,7$	$m_2 = 2,1$	$n = 1$
$r_6 = 144,5$	$d_4 = 3,9$	$n = 1,6260$
$r_7 = 48,2$	$m_3 = 7,7$	$n = 1$
$r_8 = 577,9$	$d_5 = 3,9$	$n = 1,5463$
$r_9 = 67,4$	$d_6 = 13,5$	$n = 1,6218$
$r_{10} = 52,2$		

Объективы большой светосилы с длинными фокусными расстояниями употребляются в исключительных случаях, так как они дают незначительную глубину фокуса; вследствие этого

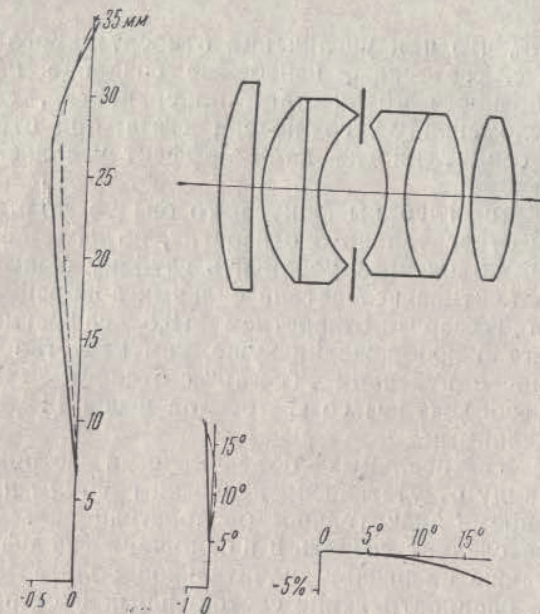


Рис. 121.

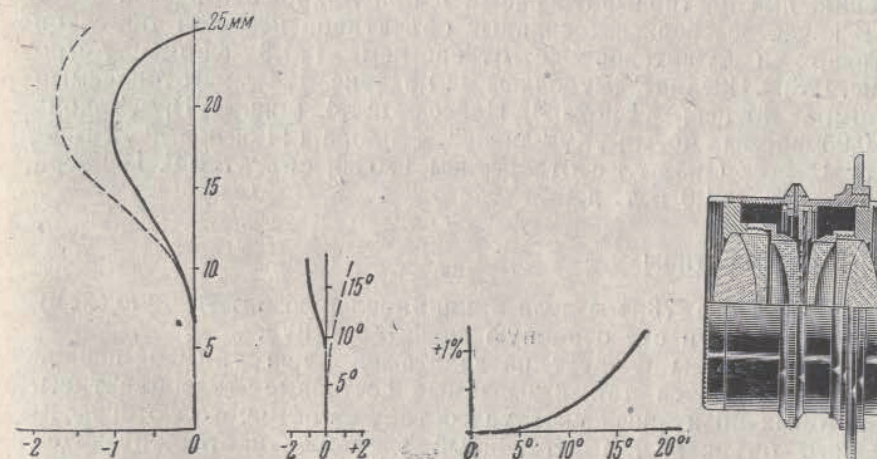


Рис. 122.

вообще объективы со светосилой выше 1:2,5 как универсальные объективы мало пригодны.

Надо считать, что при увеличении относительного отверстия объектива, т. е. светосилы, неизбежно создание конструкции объектива с большим количеством поверхностей, соприкасающихся с воздухом, ввиду чего потеря света при отражениях и поглощениях сводит иногда на-нет эффект увеличения отверстия.

Что же касается глубины фокуса, то она не только убывает с увеличением относительного отверстия, но даже не позволяет в светосильных объективах увеличить глубину фокуса диафрагмированием объектива вследствие сильных aberrаций зон. Так, если объектив „Тессар“ с отверстием 1:3,5 диафрагмировать до 1:4,5, то качество изображения хуже, чем качество изображения, полученное объективом „Тессар“ с отверстием 1:4,5.

Поэтому фотообъективы со светосилой выше 1:2,5 нельзя назвать универсальными.

Применение светосильных объективов в астрономической фотографии ввиду отсутствия практически глубины приобретает за последнее время значительное распространение.

То же самое следует сказать и в отношении аэрофото съемки, где глубина также не играет значительной роли.

Наибольшее распространение светосильных и сверхсветосильных объективов имеет место помимо кинематографии при съемках в закрытых помещениях, при сумеречном и ночном освещении, при цветной фотографии и при микрофотографии.

В качестве сверхсветосильных объективов назовем: объектив „Тахар“ и „Пантахар“ с отверстием 1:1,8 фирмы Астро (рис. 123); „Плазмат“ Рудольфа 1:1,5 (рис. 124), изготавливаемый фирмой Мейер; „Биотар“ Цейсса 1:1,4 (рис. 121); „Тахон“ 1:0,95 фирмы Астро; „Кук-линзу“ Тейлора 1:1,5; новый „R-Биотар“ Цейсса (1933 г.) с отверстием 1:0,85; объектив Г. Пандера „Паритар“ 1:1,0 и т. д.

10. Телеобъективы

Выше, на стр. 73, мы дали принципиальную оптическую схему телеобъектива и его основную характеристику.

Телеобъективы следует разделить на две группы. К первой группе относятся так называемые составные телеобъективы, у которых позитивная система состоит из обычного фотографического объектива, а негативный элемент — из рассеивающей исправленной линзы. В телеобъективах первой группы воздушный промежуток между собирающей и рассеивающей системами может меняться, вследствие чего возможно получение любой степени увеличения. На рис. 125 показана схема такого телеобъектива конструкции Дальмейера.

Позитивная собирающая система у него состоит из портрет-

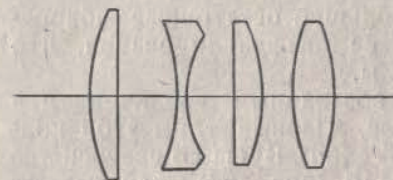


Рис. 123.

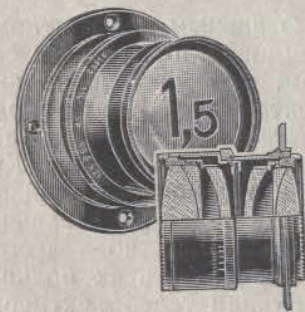


Рис. 124.

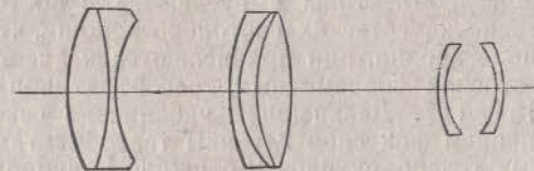


Рис. 125.

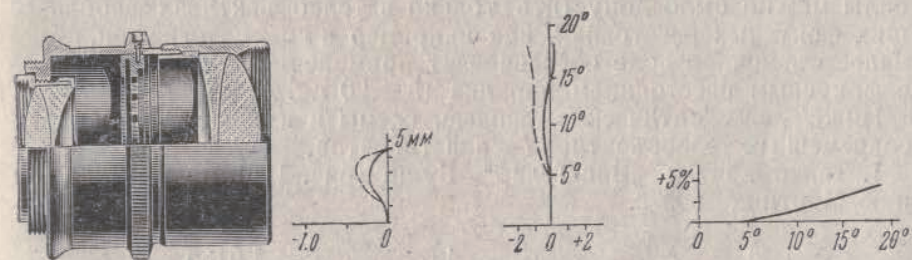


Рис. 126.

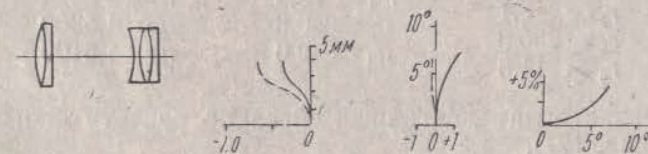


Рис. 127.

ного объектива Петцваля, рассеивающая система — из двух менискообразных линз отрицательного знака.

К телеобъективам второй группы относим специально рассчитанные системы с постоянным увеличением.

Основным недостатком составных телеобъективов является их неудовлетворительная светосила. Этот недостаток объясняется тем, что увеличение изображения, даваемого позитивным элементом телеобъектива, распределяется посредством негативной — рассеивающей линзы по большей площади, что и уменьшает яркость изображения. Кроме того большие остаточные aberrации рассеивающей линзы требуют ее диафрагмирования, что также ведет к уменьшению светосилы.

Преимущество телеобъективов с постоянным увеличением и заключается в их большой светосиле. Первые типы этой конструкции телеобъективов, как „Бис-Телер“ Буша со светосилою 1:9 (рис. 126) и „Магнар“ Цейсса 1:10 (рис. 127), показывают значительное преимущество перед составными телеобъективами.

Современные телеобъективы выпускаются с постоянным фокусом. Оптические качества их настолько хороши, что, несмотря на их малое поле зрения, они причисляются к анастигматам.

Обычная светосила современных телеобъективов колеблется в пределах 1:5—1:7. Дальнейшее увеличение светосилы связано с уменьшением фокусной глубины телеобъектива, что для длиннофокусных телеобъективов и служило причиной затруднения увеличения светосилы. Следовательно увеличение светосилы можно было допустить только в телеобъективах небольших фокусных расстояний, как например в кинематографии, где малое съемочное поле обеспечивает применение телеобъективов с фокусным расстоянием порядка 15—20 см.

Ниже даем оптические данные, схемы и кривые aberrаций современных телеобъективов — анастигматов.

1. Телеобъектив „Бис-Телер“ Буша (рис. 126) по вычислению Мартина 1905 г.

$r_1 = 12,4$	$d_1 = 1,6$	$n = 1,6136$
$r_2 = 65,5$	$d_2 = 0,6$	$n = 1,6136$
$r_3 = 21,0$	$m_1 = 15,2$	$n = 1$
$r_4 = 8,1$	$d_3 = 0,8$	$n = 1,5300$
$r_5 = 200,0$	$d_4 = 2,0$	$n = 1,5100$
$r_6 = 11,8$		

2. Телеанастигмат „Магнар“ Цейсса по расчету Вандерслеба 1908 г. (рис. 127).

$r_1 = 15,7$	$d_1 = 2,1$	$n = 1,5913$
$r_2 = 14,3$	$d_2 = 0,9$	$n = 1,6235$
$r_3 = 114,0$	$m_1 = 21,4$	$n = 1$
$r_4 = 7,7$	$d_3 = 0,5$	$n = 1,6211$
$r_5 = 11,1$	$d_4 = 1,6$	$n = 1,6197$
$r_6 = 11,1$	$d_5 = 0,9$	$n = 1,6211$
$r_7 = 77,2$		

3. „Телетессар“ Цейсса по расчету Мерте 1919 г. (рис. 128).

$r_1 = 18,1$	$d_1 = 3,3$	$n = 1,5923$
$r_2 = 38,8$	$m_1 = 0,1$	$n = 1$
$r_3 = 36,7$	$d_2 = 0,8$	$n = 1,5970$
$r_4 = 38,7$	$m_2 = 24,0$	$n = 1$
$r_5 = 10,4$	$d_3 = 1,9$	$n = 1,6241$
$r_6 = 9,4$	$d_4 = 0,8$	$n = 1,4990$
$r_7 = 17,1$		

4. Телеобъектив Росса „Телеросс“ по вычислению Хезелькуса 1922 г. (рис. 129).

$r_1 = 17,3$	$d_1 = 4,9$	$n = 1,6125$
$r_2 = 23,1$	$d_2 = 1,0$	$n = 1,6133$
$r_3 = 50,9$	$m_1 = 15,6$	$n = 1$
$r_4 = 15,3$	$d_3 = 0,7$	$n = 1,6125$
$r_5 = 13,4$	$d_4 = 4,6$	$n = 1,5225$
$r_6 = 7,7$	$d_5 = 1,0$	$n = 1,6125$
$r_7 = 22,0$		

Кроме перечисленных выше телеобъективов отметим еще ряд подобных объективов: „Телегор“ Герца 1:6,3 при двукратном увеличении, „Телединар“ Фохтлендера (рис. 130), „Теледаллон“ Дальмейера 1:5,6 и 1:3,5; фирма Тейлор и Гобсон выпускает телеанастигматы со светосилой 1:3,5 и пр.

11. Фотообъективы с переменным фокусным расстоянием

Фотообъективы с переменным фокусом в киносъемке приобретают исключительное значение. Возможность быстрого перехода от малого фокусного расстояния объектива к большому при револьверных объективных головках с набором 3—4 разных по фокусной длине объективов не всегда удовлетворяет кинооператора.

Помимо этого очень часто от вибрации киносъемочного аппарата расстраивается юстировка отдельных объективов, укрепленных в револьверной головке, вследствие чего при переходе от одного объектива к другому мы не получаем изображения в одной плоскости.

Кроме того следует учесть и значительную стоимость полного набора отдельных съемочных объективов.

Таким образом интерес кинооператора к объективу с переменным фокусным расстоянием весьма актуален. В настоящее время мы не имеем большого числа таких объекти-

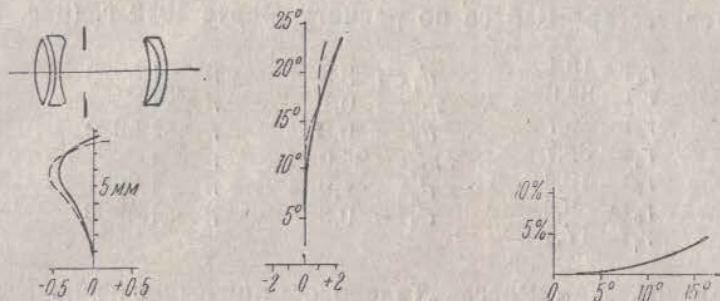


Рис. 128.

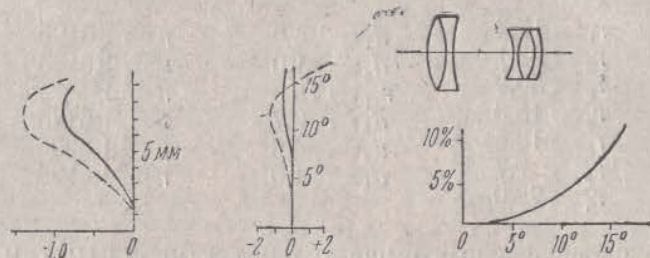


Рис. 129.

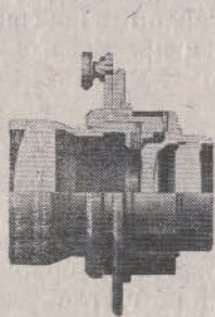


Рис. 130.



Рис. 131.

вов ввиду новизны этого дела: но 3—4 объектива, выпущенные в течение 1933 г., заслуживают внимания.

Эти объективы нельзя назвать телеобъективами с разным увеличением, так как составные телеобъективы дают разность увеличения для предметов, значительно удаленных от объектива. От кино объектива же требуется съемка на расстоянии от 1 м до бесконечности.

Первый такой кинообъектив с переменным увеличением был выпущен в Америке в 1932 г. по расчету Дурхольца. Он имеет переменное фокусное расстояние в пределах 40—160 мм. Коррекция на хроматическую и сферическую аберрации у него аналогична анастигмату со средним полем зрения. При переходе от малого снимка к снимку большим планом и обратно установка на резкость регулируется автоматически. Возможный предел изменений фокусного расстояния таков, что от снимка на одном нормальном кадре 16 голов возможен переход к изображению крупным планом одной головы.

Второй вариант решения упомянутой задачи произведен фирмой Е. Буш. Указанная фирма выпустила в 1933 г. новый вид трехлинзового объектива, в котором изменение фокусного расстояния, а следовательно и величины изображения, достигается перемещением одной средней линзы.

К объективу Буша следует отнести и универсальный „Гелиар“ Фойхтлендера с перемещаемой средней линзой (рис. 131).

Правда, он предназначен не для тех целей, как два разобранных выше объектива, и рекомендуется для получения „мягких“ художественных снимков; тем не менее в принципе его оптическая схема такова, что при перемещении средней линзы мы получаем изменение фокусного расстояния, конечно в весьма ограниченных размерах. Получение некоторой мягкости рисунка происходит в этом „Гелиаре“ оттого, что его коррекция сделана при нормальном положении средней линзы. Перемещение ее вызывает увеличение остаточных аберраций в такой комбинации, которая дает приятное смягчение рисунка.

12. Советские фотообъективы

Производство фотообъективов в Союзе, естественно, совпадает с организацией изготовления фотографических аппаратов. До этого времени отдельные оптические заводы в виде пробы изготавливали лишь образцовые экземпляры фотообъективов. Это был период, когда наша молодая оптическая промышленность пробовала свои силы на фронте фотографической оптики.

Четыре первых советских фотообъектива, не получивших промышленного распространения, были изготовлены как образцовые в период 1925—1928 гг.

Все четыре объектива относятся к светосильным анастигматам: первый из них—„Киностигмар II“ (рис. 132) с отверстием 1:4,5 из советских стекол. При отсутствии кривизны поля для угла в 45° объектив все же обладал недостатком в отношении хроматизма, так как вырабатываемые в то время советские оптические стекла не давали возможности решить эту систему с лучшим значением для хроматизма.

В 1927 г. Государственным оптическим институтом был рассчитан триплет для угла в 48° и с отверстием 1:3,5. Так как для этого объектива были взяты другие новые сорта стекла, то триплет ГОИ 1927 г. имел преимущество перед объективом „Киностигмар II“. Его схема и кривые aberrаций представлены на рис. 133.

Годом позже ГОИ рассчитал первый советский светосильный объектив с отверстием 1:2,0. Схема его и кривые показаны на рис. 134.

Одновременно завод ГОМЗ изготовил светосильный объектив „Фотогроз“ с отверстием 1:2 и $f=60$.

Как указано выше, все перечисленные четыре объектива не получили массового распространения. С выпуском же фотоаппаратов развилось и массовое производство фотообъективов.

В выпускаемых заводом ГОМЗ фотокамерах монтированы следующие объективы:

1. „Ортогроз“ с отверстием 1:4,5 и $f=135$. Объектив сходен с „Целором“ Герца, но менее исправлен в отношении кривизны поля. Его оптическая схема и кривые aberrаций представлены на рис. 135.

2. Объектив „Индустар“ 1:4,5 изготавливается с фокусными расстояниями 105, 135 и 210 мм. Объектив представляет собой схему по „Тессару“; изготовлен он из советских стекол. Его кривые ошибок (рис. 136) не превосходят кривых цейссовского „Тессара“, вследствие чего „Индустар“ считается значительно лучше „Ортогоза“.

Для киносъемочных аппаратов может быть применен фотообъектив ФДА по расчету ГОИ, изготавливаемый 19-м заводом для советских „Леек“. Его фокусное расстояние равно 50 мм, отверстие 1:3,5.

Конструкция объектива та же, что и „Индустара“ (рис. 136); при 50 мм он покрывает резко поле 24×36 мм.

Первые опыты изготовления советских анастигматов увенчались успехом. В ближайшее время ожидается выпуск еще более совершенных советских фотокинообъективов для разных целей.

13. Производство фотокинообъективов

Изготовлению объективов на оптических заводах предшествует вычислительная и конструкторская работа. Наиболее трудная и ответственная задача лежит на вычислителе, занятом расчетом оптической системы объектива. Вычисление фотографических объективов принадлежит к числу труднейших задач практической оптики, так как они должны обладать большой резкостью для поля зрения (не менее 40°); кроме того мы тре-

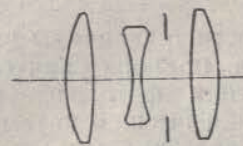


Рис. 132.

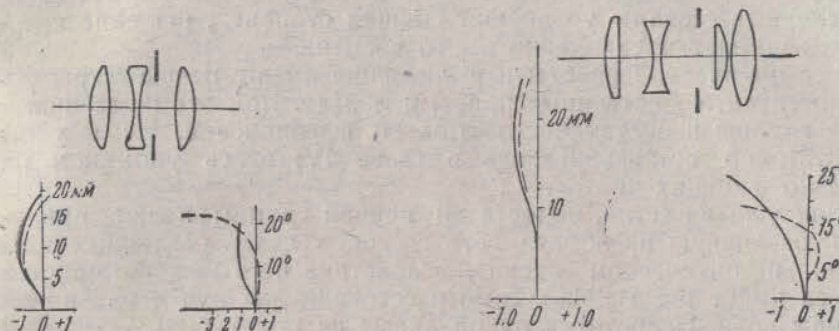


Рис. 133.

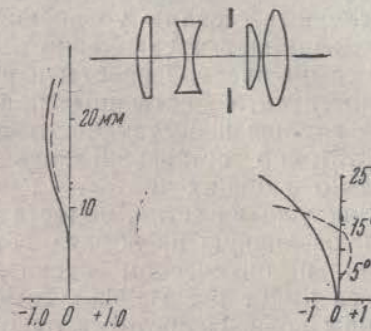


Рис. 134.

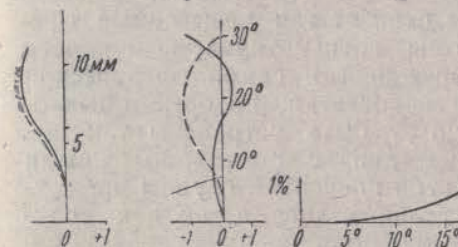


Рис. 135.

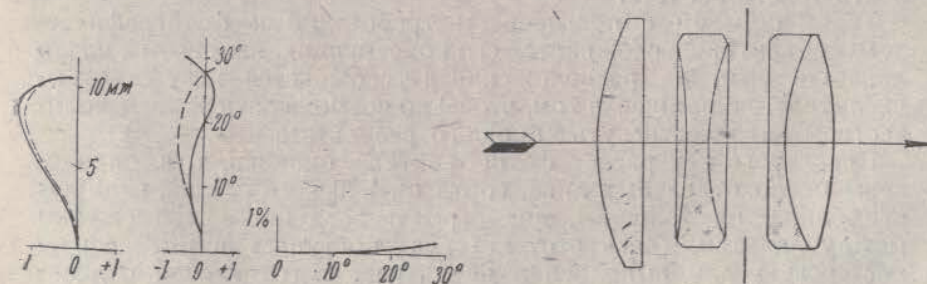


Рис. 136.

бует от них точного совпадения плоскости и величины изображения для лучей различных цветов, т. е. полного уничтожения вторичного спектра. Для расчета оптики фотографического объектива совершенно не требуется знания высшей математики, но ввиду многих входящих в расчет неизвестных (в первую голову—радиусы линз, толщина и расстояние их между собой, коэффициенты преломления стекла и т. д.) получаются многочисленные системы уравнений высших степеней, решение которых занимает чрезвычайно много времени.

Все оптические работы и вычисления имеют целью устранить недостатки, свойственные простым линзам. При этом различают две группы недостатков: цветные и сферические. На них мы достаточно останавливались в главе IV; здесь упомянем их только в общих чертах.

Как уже известно, недостатки первой группы имеют причиной различную преломляемость световых лучей различных длин волн в оптическом стекле, вследствие чего каждая простая линза имеет разные фокусные расстояния для лучей различной длины волн. Недостатки одной линзы не могут быть устранены непосредственно в ней самой,—следовательно устранение того или иного недостатка одной линзы возможно с помощью обратного недостатка другой линзы.

Ко второй группе недостатков относят так называемые сферические аберрации—в виде комы, астигматизма, выпуклости изображения, искривления изображения и самой сферической аберрации. Все эти сферические недостатки, которые обыкновенно являются одновременно, могут быть устранены так же, как и цветные, т. е. применением линз с противоположными свойствами. Однако недостатки этой последней группы преимущественно зависят от формы отдельных линз, а так как получение свободного от астигматизма поля зрения требует известного выгибания всей системы, что в свою очередь ведет к более крупным ошибкам зон, то совершенно очевидна трудность такого расчета.

Таким образом с повышением требований к фотографическому объективу усложняется его конструкция, изменяется число линз системы, их расположение и усложняется искусство вычислителя, состоящее в том, чтобы по возможности малым количеством линз достигнуть хорошего результата.

После того как расчет фотообъектива окончен, т. е. определены число отдельных линз, сорта оптического стекла, радиусы этих линз, их толщины, диаметры и воздушные промежутки между линзами,—весь этот материал поступает в оптическую мастерскую для выполнения объектива. Изготовление отдельных линз для фотообъективов разбивается на четыре основных этапа производства: шлифовка, полировка, центрировка и склейка.

Поступающее на шлифовку стекло для объективов предварительно разрезается алмазной пилой (рис. 137) на ряд отдельных пластин, которые после округливания вручную подвергаются шруповке сначала песком, а затем крупным наждаком. Шруповка придает стеклянной пластинке необходимую форму, которая в дальнейшем уточняется шлифовкой и полировкой.

Первоначальная обдирка, или, как мы называли выше, шруповка, в настоящее время механизирована методом фрезеровки стекла помощью алмазных инструментов. Эти инструменты представляют собой ряд медных фрез сферической или цилиндрической формы, на поверхности которых набита алмазная пыль. Медь оказалась самым подходящим материалом для алмазных фрез, так как алмазные зерна вследствие тягучести металла прочно закрепляются в нем.

Машины для этого способа обработки строятся по образцу обычных фрезерных станков, а самый процесс фрезеровки происходит при относительно больших скоростях и при постоянном смачивании керосином или особой эмульсией.

После предварительной шруповки точная обработка линзы происходит уже на специальных станках с применением исключительно наждаков разных размеров (разной крупности). С целью удешевления работы отшрупованные линзы с помощью наклеечной смолы укрепляются на корпусах по несколько штук (рис. 138). Каждый корпус имеет соответствующую чашку, которая служит инструментом для шлифовки. Упомянутые корпуса с линзами вращаются на вертикальном шпинделе шлифовочного станка со скоростью 80—140 об/мин. и трутся о металлическую чашку. Между корпусом и чашкой время от времени вводят наждак определенной крупности, который и совершает работу по шлифовке линз, т. е. придает им более правильный вид. Разумеется, корпуса и чашки применяются соответствующего радиуса согласно заданному расчету. Процесс шлифовки начинается наждаком крупной зернистости, постепенно заменяют все более мелким и заканчивают самым мелким наждаком. Как только шлифовка считается законченной, корпус тщательно обмывается в дой и передается на полировку в другое помещение, чтобы избежать возможных царапин на стекле от случайно попавшего наждака.

Материалом для полировки в настоящее время служит крокус—особо приготовленная, обожженная при высокой температуре и очень тонко отмученная окись железа.

Полирующей поверхностью в этом случае уже не может быть металл; вместо металла употребляются мягкие вещества, в которые частички крокуса легко могли бы вдавливаться. Таким веществом, дающим самую точную полировку, является особо приготовленная смола, которой и покрывается полирую-

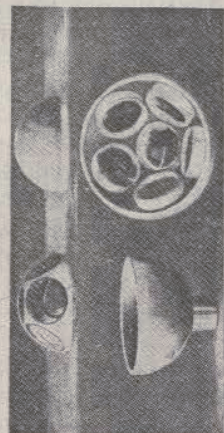


Рис. 138.

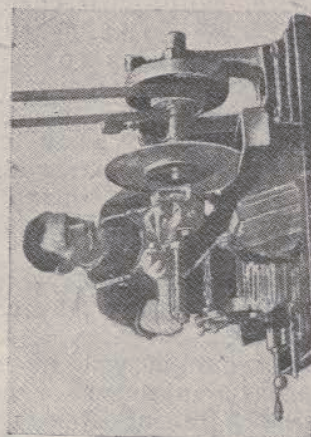


Рис. 137.



Рис. 140.

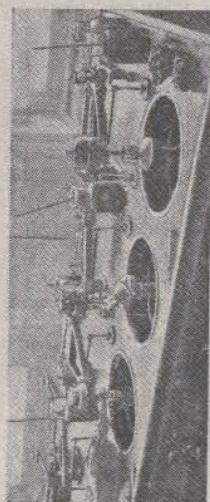


Рис. 139.

шая чашка. Таким образом процесс полировки напоминает собой способ тонкой шлифовки; разница заключается в том, что полирующая чашка, покрытая слоем смолы, движется по корпусу, на который кисточкой наносят раствор крокуса.

Полировочные автоматические станки мало отличаются по конструкции от шлифовочных; они соединены по несколько шпинделей в один агрегат и обслуживаются одним рабочим. На рис. 139 представлен автоматический станок для полировки фотообъективов.

Сущность физических явлений, происходящих при полировке стекла, еще совершенно не выяснена. Существуют две главных теории, исключающие друг друга: первая, рассматривающая процесс полировки как процесс химического характера (образование на стекле поверхностной пленки), и вторая, считающая полировку исключительно механическим процессом.

Как в первом, так и во втором случае процессом полировки добиваются кроме правильного заданного радиуса получения такой поверхности, которая не имела бы царапин и неровностей от шлифовки и обладала максимальной прозрачностью. Об окончании полировки узнают с помощью так называемого пробного стекла, т. е. такого стекла, которое должно быть изготовлено по данному радиусу с наибольшей точностью. Для проверки берут пробное стекло противоположного знака: так для выпуклых линз берут вогнутое пробное стекло, а для вогнутых линз — выпуклое и, очистив хорошо поверхность законченных полировкой линз, накладывают на одну из них пробное стекло и наблюдают ньютоновы цветные кольца, получаемые на основании закона интерференции света. Если цветные кольца расположены неправильно, — это показывает, что линза имеет отступление от шаровой поверхности, и тогда корпус вновь идет на полировку. Количество же колец при правильном их расположении указывает на отступление от радиуса пробного стекла.

Качество полировки линз, применяемых для фотообъективов, должно быть особо высокое.

Для линз, идущих на универсальные объективы, полировка считается законченной только в том случае, когда при наложении пробного стекла мы наблюдаем по всей поверхности линзы ровный соломенно-желтый цвет.

Контроль на чистоту поверхности линзы поверяется под мощным источником света через соответствующую лупу (рис. 140). После полировки первой стороны линз они отклеиваются от корпуса и снова наклеиваются на другие корпуса для обработки в том же порядке второй поверхности.

Когда закончена полировка второй поверхности линзы, приступают к ее центрировке, т. е. к окончательному округливанию краев линзы относительно оптической оси стекла.

Центрировка линз фотообъектива является одной из труднейших и ответственных операций, так как требует совершенно точного совпадения осей нескольких находящихся в объек-



Рис. 141.

тиве линз для получения свободной от недостатков оптической системы.

Как нам уже известно, фотообъективы состоят из отдельных оптических элементов, или склеенных или разделенных воздушным промежутком. Следовательно после центрировки некоторые линзы для спаривания идут на склейку. Обе под-

лежащие склеиванию линзы слегка подогреваются, на одну из них помещают каплю канадского бальзама затем накладывают одну линзу на другую и постепенно выжимают излишки бальзама. Совпадение оптических осей склеиваемых линз и здесь является одним из главных требований, — поэтому операцию склеивания производят на специальных аппаратах, контролирующих совпадение оптических осей.

После склейки линзы передаются в сборочный цех на сборку. Первоначально одна или несколько линз, в зависимости от конструкции объектива, вставляются в металлическую оправу, после чего эти отдельные оптические системы ввинчиваются в затвор, или основной тубус фотообъектива. Укрепление отдельных линз в оправе фотообъектива и его общий монтаж также проходят под знаком сохранения единой оптической оси.

Малейшее отклонение от этого основного требования сводит на-нет хорошие оптические качества фотообъектива.

На рис. 141 показаны монтаж и окончательная заделка линз в собранном фотообъективе.

Выверка и испытание готовых фотообъективов указаны ниже.

Глава VI. Оптические свойства фотообъективов

1. Фокусное расстояние объектива и величина изображения

Фокусное расстояние объектива определяет величину изображения за исключением случаев съемки предметов на весьма близком расстоянии.

Как нам уже известно, отношение величины изображения y' объекта, получаемого фотообъективом, к величине объекта y называется линейным увеличением (см. стр. 36).

Предположим, что на фотообъектив с определенным фокусным расстоянием падает под некоторым углом α от бесконечно удаленного объекта параллельный пучок лучей (рис. 142).

После прохождения лучей через объектив этот параллельный пучок собирается в точке S' , т. е. в задней фокальной плоскости объектива.

Из рисунка видно, что величина изображения y' равна:

$$y' = f' \operatorname{tg} \alpha'$$

Следовательно, чем больше фокусное расстояние объектива, тем больше величина y' .

Выбор подходящего фокусного расстояния определяется размером применяемой пластинки или пленки. Для обычной работы рекомендуется выбирать объектив, у которого фокусное расстояние равно диагонали пластинки.

Чтобы примерно определить масштаб изображения предмета на матовом стекле, можно руководствоваться следующим рассуждением. Обозначим величину предмета через y (рис. 143), величину изображения — через y' , расстояние от предмета до объектива — через $x + f$ и расстояние от объектива до изображения — через $x' + f'$. В этом случае будем иметь следующее равенство:

$$\frac{y'}{y} = \frac{x' + f'}{x + f}, \quad (49)$$

т. е. y' во столько раз меньше y , во сколько $x' + f'$ меньше $x + f$.

Так например, если фокусное расстояние кинообъектива равно 50 мм, а расстояние до предмета равно 20 м, то значит фокусное расстояние в 400 раз меньше расстояния до предмета,

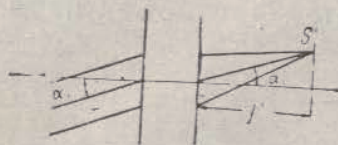


Рис. 142.

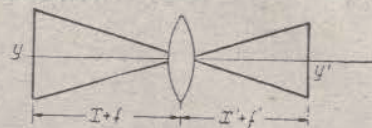


Рис. 143.

а следовательно и изображение предмета y' на пленке будет также в 400 раз меньше его натуральной величины.

Несмотря на то, что перспектива, воспроизводимая фотообъективом, всегда является геометрически точной и независимой от расстояния между объективом и предметом, она тем не менее редко согласуется с нашим субъективным представлением о перспективе.

Это явление происходит вследствие того, что при рассмотрении позитивного фотографического снимка правильность относительного расположения точек воспроизводимого воображением пространства, т. е. правильность перспективы, зависит от расстояния глаза до рассматриваемой картины. Если снимок рассматривается глазом наблюдателя, помещенным точно на такое же расстояние, на каком в момент фотографирования находилась пластинка или пленка, то наблюдатель будет видеть снимок в правильной перспективе. Если же глаз наблюдателя будет помещен перед снимком ближе или дальше, чем расстояние между объективом и пластинкой, то правильность перспективы будет нарушена. Следовательно для правильного воспроизведения перспективы необходимо, чтобы глаз наблюдателя находился на таком расстоянии от снимка, на котором все угловые расстояния между точками снимка были бы равны угловым расстояниям между соответственными точками действительного пространства.

Ввиду того, что в большинстве случаев фокусное расстояние фотообъективов несколько меньше расстояния наилучшего зрения (250 мм), при котором возможно писать, читать и т. д. нормальным глазом, — выполнить правило обязательного соблюдения расстояния от снимка до глаза, равного фокусному расстоянию объектива, невозможно. Поэтому рекомендуется пользоваться для рассмотрения снимка лупой или простой линзой с фокусным расстоянием, равным фокусному расстоянию объектива.

2. Поле зрения и поле изображения

В главе второй, о зрачках и диафрагмах, было указано, что поле изображения фотообъектива фиксируется диафрагмами,

вставленными в объектив. Казалось бы, что при таком положении тот или иной объектив, смонтированный в предназначенную ему фотокамеру, и будет постоянен в отношении величины поля изображения. В действительности же для получения максимальной яркости всего поля фотообъективы имеют несколько большее поле изображения, в чем нетрудно убедиться, переставив испытуемый объектив в камеру с большим форматом пластинки. В этом случае мы получим максимальное изображение круга, которое называется **полем зрения** — A . Угол, под которым образуется это изображение, называется **углом поля зрения** и определяется формулой:

$$\frac{h}{f'} = \operatorname{tg} \varphi, \quad (50)$$

где h — диаметр круга, полученный на пластинке от бесконечно удаленного предмета.

Поле изображения — B представляет собой только часть поля зрения, причем та часть, которая дает наиболее резкое изображение максимальной и одинаковой яркости. За пределами поля изображения (рис. 144) уменьшаются как резкость, так и яркость изображения, следовательно поле изображения, годное для съемок, всегда меньше обычного поля зрения как наиболее исправная в фотообъективе часть.

Действительное поле изображения определяется в фотообъективе по длине диагонали той пластинки, которая рекомендуется заводом для объектива данного фокусного расстояния.

Предположим, что мы имеем объектив с фокусным расстоянием в 130 мм, предназначенный для формата 9×12 см. Прежде всего определяем диагональ этой пластинки, извлекая

$$\sqrt{A^2 + B^2},$$

где A и B — стороны указанной пластинки; имеем:

$$\sqrt{9^2 + 12^2} = \sqrt{225} = 15 \text{ см.}$$

Следовательно величина поля изображения будет равна 150 мм. Пользуясь формулой (50), определяем угол поля изображения; в нашем примере он будет равен:

$$\frac{75}{130} = 30^\circ \cdot 2 = 60^\circ.$$

Если не указан формат пластинки, то диаметр поля изображения принимается равным фокусному расстоянию объектива.

Поле изображения фотообъектива различно; в зависимости от назначения и конструкции оно колеблется в пределах от 20 до 140°.

3. Светосила объектива и его относительное отверстие

Количество света, прошедшее через объектив на пластинку, является важнейшим фактором в определении яркости изображения, так как количество света устанавливает требуемую величину экспозиции. Очевидно, диаметр входного отверстия фотообъектива и определяет яркость изображения или светосилу объектива. Если яркость изображения прямо пропорциональна квадрату действующего диаметра объектива, тогда в объектив с диаметром, вдвое меньшим, попадает вчетверо меньшее количество света при прочих равных условиях.

Для световой точки, лежащей на оси системы (рис. 145) фокусное расстояние системы не влияет ни в какой мере на яркость изображения S' , и решающее значение имеет только действующее отверстие.

Совсем иное дело, когда вместо точки берется часть освещенной площади: тогда фокусное расстояние объектива играет значительную роль в светосиле объектива.

При равных диаметрах двух фотообъективов светосила одного по отношению к другому будет тем меньше, чем больше фокусное расстояние. Объяснение этого приведено на рис. 146; два одинаковых по своему диаметру объектива имеют разное фокусное расстояние.

Предмет PA по своему масштабу одинаков как для верхней схемы, так и нижней. Из рисунка видно, что при съемке объективом с более коротким f' предмет изобразится меньшим, чем при съемке с объективом, у которого фокусное расстояние больше. Если допустить, что у нижнего объектива (рис. 146) фокусное расстояние больше верхнего в два раза, то и линейные размеры изображения его будут больше в два раза,—это значит, что площадь его изображения будет вчетверо больше, чем в первом.

Мы уже указали, что диаметры этих объективов одинаковы, следовательно и количество падающего на них света также одинаково, вследствие чего яркость изображения в объективе с большим фокусным расстоянием будет вчетверо меньше, чем в короткофокусном объективе.

На основании изложенного можно утверждать, что светосила второго, длиннофокусного объектива вчетверо меньше, чем светосила первого короткофокусного. Из этого закона следует

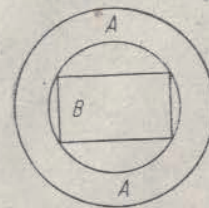


Рис. 144.

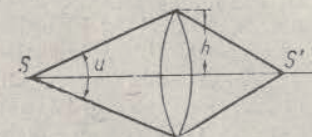


Рис. 145.

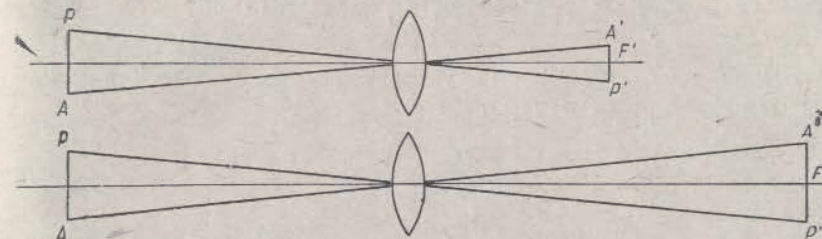


Рис. 146.

сделать вывод, что яркость изображения предмета, а следовательно и светосила объектива, обратно пропорциональны квадрату фокусного расстояния.

На основании изложенного мы можем написать следующее отношение:

$$\frac{\text{количество света}}{\text{площадь изображения}} = K \frac{d^2}{f^2}, \quad (51)$$

где K — коэффициент пропорциональности, который может быть равен единице при надлежащем выборе величин.

Левая часть этого отношения выражает не что иное, как яркость изображения.

На практике в фотографической оптике не пользуются отношением $\frac{d^2}{f^2}$, а более простым $\frac{d}{f}$. Это последнее можно представить в следующем виде;

$$\frac{1}{f:d},$$

т. е. в виде дроби с числителем, равным единице, и знаменателем, показывающим, во сколько раз f больше d .

Отношение $\frac{d}{f}$ и называется **относительным отверстием**, или **светосилою объектива**.

Обычно всеми оптическими заводами, вырабатывающими фото-объективы, светосила объектива обозначается относительным отверстием, выгравированным на объективе (рис. 147) в виде дроби: 1:3,5; $F:3,5$; $1/3,5$ и т. д. Если мы имеем объектив с $F=150$ мм и диаметром входной диафрагмы в 30 мм, то его относительное отверстие будет равно:

$$\frac{d}{f} = \frac{30}{150} = \frac{1}{150:30} = \frac{1}{5} = 1:5,0.$$

Светосилы двух объективов относятся между собой, как квадраты относительных отверстий:

$$\frac{d^2}{f^2} : \frac{d'^2}{f'^2}. \quad (52)$$

Полученное число должно показать, во сколько раз светосила первого объектива больше или меньше светосилы второго.

Возьмем для примера два объектива, у которых светосила равна 1:3,5 и 1:4,5; требуется определить, во сколько раз первый объектив светосильнее второго. По приведенным выше формулам имеем:

$$\left(\frac{1}{3,5}\right)^2 : \left(\frac{1}{4,5}\right)^2 = \frac{1}{12,25} : \frac{1}{20,25} = \frac{1}{1,6}, \text{ или } 1:1,6.$$

Следовательно объектив 1:3,5 в 1,6 раза светосильнее объектива 1:4,5. Таким образом при переходе с первого объектива на второй при равных условиях освещения продолжительность экспозиции необходимо увеличить в 1,6 раза.

Светосила каждого фотографического объектива при полном отверстии диафрагмы — **величина постоянная**. В то же время для целей практической эксплуатации объектива при разных условиях освещения предмета необходимо в некоторых случаях изменение светосилы объектива путем применения ирисовой диафрагмы, установленной в надлежащем месте в фото-объективе. С изменением же величины диафрагмы объектива изменяем и его светосилу. Для точной установки диафрагмы на оправе объективов наносится гравировкой ряд чисел (рис. 148), представляющих собой систему обозначения диафрагм. Эти числа указывают светосилу объектива при данном положении диафрагмы.

Подавляющее большинство современных объективов снабжается обозначением диафрагм, соответствующих светосилам, в виде ряда: 4,5; 6,3; 9; 12,5; 18; 25; 36; 50 и т. д. (здесь всюду выброшен числитель—1), при котором каждая следующая диафрагма требует экспозиции вдвое большей, нежели предыдущая.

В настоящее время наиболее распространенной является система обозначений диафрагм Штольце, употребляемая на большинстве немецких объективов. Наибольшее относительное отверстие по этой системе равно 1:3,2; при этом экспозиция принимается за единицу.

Шкалу Штольце приводим в следующей таблице:

Относительное отверстие . . .	3,2	4,5	6,3	9	12,5	18	25
Относительная экспозиция . .	1	2	4	8	16	32	64

Кроме системы диафрагм Штольце существует еще распространенная система нумерации диафрагм, — так называемая английская, принимаемая и на современных объективах Цейсса.

Относительное отверстие	4	5,6	8	11	16	22	32
Относительная экспозиция	1	2	4	8	16	32	64

Как видно из таблички, за единицу экспозиции принята диафрагма 4.

Пользование указанными табличками разберем на следующем примере.

Предположим, что мы производим съемку объективом со светосилой 1:4,5 при экспозиции в 3 сек.; этим же объективом нам нужно произвести съемку при прочих равных условиях, но с отверстием 1:12,5. Какова же должна быть экспозиция при этой светосиле?

По таблице Штольце видим, что при диафрагме 4,5 экспозиция равна 2, а при диафрагме 12,5 она равна 16, т. е. в 8 раз больше; следовательно при диафрагме 1:12,5 экспозиция будет равна $3 \times 8 = 24$ сек.

Следует сделать предупреждение, что некоторые фирмы не придерживаются приведенных выше таблиц и дают на объективах значение не относительных отверстий, а относительных экспозиций.

Очевидно, прежде чем пользоваться диафрагмой, нужно выяснить значение величин, указанных на объективе.

Необходимо твердо помнить, что наши рассуждения о светосиле фотообъективов имели в виду съемку предметов, относительно удаленных от объектива, т. е. когда их изображения ложились вблизи фокальной плоскости. Следовательно в случае съемки предметов, близко расположенных к объективу (порт-



Рис. 147.



Рис. 148.

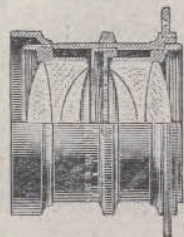


Рис. 149a.



Рис. 149б.

ретная съемка, съемка крупным планом и т. д.), изображение их будет дальше фокальной плоскости, а тем самым и расстояние от объектива до пластинки становится длиннее, что влечет уменьшение яркости изображения по мере вытягивания камеры, т. е. удлинения расстояния от объектива до изображения.

При съемке в натуральную величину изображение будет находиться на двойном фокусном расстоянии, вследствие чего яркость его уменьшится в 4 раза.

Говоря о светосиле фотографических объективов, мы не учитывали потери света при прохождении через стекло. Эти потери слагаются от поглощения света непосредственно самим стеклом в размере 1—1,5% на 1 см стекла и от 4 до 5%—при прохождении света каждой поверхности оптической системы, ограниченной воздухом,—вследствие отражений.

Таким образом существующее мнение, что все объективы с одинаковым отверстием одинаковы и по светосиле—в смысле требования одной и той же экспозиции, не соответствует действительности. Это мнение справедливо только для объективов однотипной конструкции и не может быть применимо к объективам разных конструкций, хотя и одинаковой светосилы.

При одинаковых фокусных расстояниях и входных зрачках светосильнее будет тот объектив, у которого имеются меньшее

количество отдельных поверхностей, граничащих с воздухом, и более тонкие линзы. Для примера приводим следующую характеристику двух объективов Мейера: двойной анастигмат 1:6,8 (рис. 149a) и двойной анастигмат—„Евриплан“ 1:6,8 (рис. 149б).

При равных относительных отверстиях этих двух объективов вследствие их разной конструкции светосильнее будет анастигмат а как анастигмат, имеющий меньшее количество поверхностей, соприкасающихся с воздухом.

Теоретический расчет светосилы этих объективов, произведенный нами, показал, что, если принять за 100% количество упавшего на объективы света, то по выходе света из объектива а потеря его от поглощения и отражений составит 21%, а по выходе его из объектива б—36%. Общее же количество света, прошедшего через весь объектив а, составит следовательно 79%, а для объектива б—64%.

Обработав полученные данные применительно к интенсивности освещения условной площадки, одинаковой для двух объективов, мы получим фактическую светосилу упомянутых объективов Мейера: первого (а) 1:6,8, второго—1:7,3.

Очевидно, при одинаковых условиях съемки объектив „Евриплан“ как менее светосильный будет требовать большей экспозиции.

4. Резкость изображения

Введем более определенное понятие о резкости изображения, даваемого фотографическим объективом.

Допустим (рис. 150), что в плоскости S' мы имеем сопряженный фокус светящейся точки на оси фотообъектива.

Если матовое стекло поместить в плоскости S' , то очевидно изображение точки будет иметь максимальную резкость. Если же мы начнем перемещать матовое стекло из этой точки в положение 1 или 2, тогда вместо точки на матовом стекле образуется круг рассеяния, ограниченный диаметром Z и Z' .

Выше нами была выведена формула разрешительной способности глаза, или резкого видения, основанная на том, что каждая точка объекта дает на сетчатке глаза кружок рассеяния не более определенной величины. Если кружок рассеяния несколько больше этой предельной величины, то соседние кружки налагаются друг на друга и делают изображение нерезким и размытым. Вышеупомянутую предельную величину разрешающей силы (остроты) глаза мы вывели равной одной угловой минуте.

Следовательно фокусировка, или точность наводки на максимальную резкость, будет выполнена в том случае, когда круг

рассеяния в плоскости пластинки или пленки не будет превосходить $1'$.

Так как рассматривание изображений производится нами на расстоянии ясного зрения, принятого за величину в 250 мм, нетрудно вывести тот максимальный диаметр Z и Z' круга рассеяния при угловой величине в $1'$, который будет равен 0,07 мм.

На основании изложенного можно сделать заключение, что перемещение от плоскости S' в положение 1 или 2 будет иметь место до величины ZZ' , равной 0,07 мм. Это расстояние между предельными положениями матового стекла, при которых светящаяся точка еще кажется точкой, а не кругом рассеяния, называется глубиной фокусной резкости.

Определим глубину фокуса при положениях 1 и 2 (рис. 150). Обозначим через $2h$ диаметр отверстия объектива, S' — расстояние сопряженного фокуса и Z — максимально допустимый диаметр круга, образованного лучами, сходящимися в точке S' . Из рисунка видно, что

$$\frac{\Delta}{S'} = \frac{Z}{2h}; \quad (53)$$

откуда

$$\Delta = \frac{ZS'}{2h}. \quad (54)$$

Общая глубина фокусной резкости очевидно будет равна $2\Delta(\Delta + \Delta')$.

С уменьшением рабочего отверстия объектива при неизменном положении точки S' уменьшается и угол U , а с ним и диаметр круга Z .

Б. Глубина изображаемого пространства

При всяких фотосъемках, а в особенности при киносъемках, необходимо знать границы действующего пространства между передним и задним планами, которые объектив в состоянии изобразить с одинаковой резкостью.

Пусть на рис. 151 точки M, M_1, M_2 представляют собой точки предметов, находящихся на разных расстояниях от объектива.

Допустим, что матовое стекло находится в сопряженном фокусе M' точки M , находящейся в пространстве предмета на расстоянии S от объектива и на расстоянии S' в пространстве изображения. Точка M в данном случае называется точкой наведения.

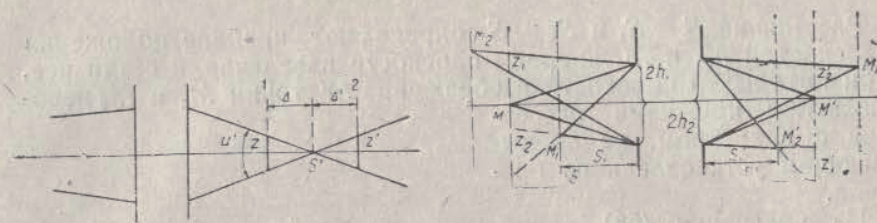


Рис. 150.

Рис. 151.

Так как диаметры входного и выходного зрачков — $2h_1$ и $2h_2$ имеют конечные размеры, то все точки пространства, не лежащие в плоскости наведения, как например точки M_1 и M_2 , имеют изображение в плоскости M' не в виде точек, а в виде кружков рассеяния с диаметрами Z'_1 и Z'_2 .

Допустим далее, что при данном положении матового стекла изображения точек M_1 и M_2 будут иметь круги рассеяния, не превышающие величины 0,07 мм, т. е. одинаково резкие с точкой M . Тогда расстояние $M_1M_2 = S_2 - S_1$ называется глубиной изображения пространства, причем часть глубины $M_2M = S_2 - S$ называется глубиной заднего плана, а $MM_1 = S - S_1$ называется глубиной переднего плана.

Для получения соответствующих формул нам остается установить величину кружков рассеяния в плоскостях пространства Z_1 и Z_2 . Диаметры кружков рассеяния в обеих плоскостях связаны между собой так, как и всякие два сопряженных отрезка в сопряженных плоскостях, где;

$$Z'_1 = \beta Z_1 \text{ и } Z'_2 = \beta Z_2. \quad (55)$$

и где β — линейное увеличение в сопряженных плоскостях M и M' .

Установив предельную величину диаметров кружков рассеяния в обеих сопряженных плоскостях, находим отрезки S_1 и S_2 :

$$S_1 = \frac{2hS}{2h + Z_2} \text{ и } S_2 = \frac{2hS}{2h - Z_1}. \quad (56)$$

Разности же $S - S_1$ и $S_2 - S$ определим:

$$S - S_1 = \frac{SZ_1}{2h + Z_1} \text{ и } S_2 - S = \frac{SZ_2}{2h - Z_2}. \quad (57)$$

Подставив в уравнение (57) вместо Z_1 и Z_2 предельное их значение K , где $K = 1' = 0,00029$ мм, получим:

$$S - S_1 = \frac{S^2K}{2h + SK} \text{ и } S_2 - S = \frac{S^2K}{2h - SK}. \quad (58)$$

Расстояния $S - S_1$ и $S_2 - S$ определяют крайние положения плоскостей M_1 и M_2 впереди плоскости наведения и сзади нее, при которых в плоскости изображения M' точки M_1 и M_2 изображаются кружками рассеяния с диаметром, не превышающим установленного предела.

Из уравнения (58) видно, что глубина пространства определяется только диаметром входного зрачка объектива и не зависит от фокусного расстояния или каких-либо других величин фотообъектива.

Так как $S_2 > S_1$, то глубина пространства вдаль больше, чем к объективу.

Условие, при котором, начиная с некоторого расстояния, все предметы будут изображаться резко, будет:

$$S_2 - S_1 = \infty \text{ или } 2h - SK = 0,$$

откуда

$$S_\infty = \frac{2h}{K}. \quad (59)$$

Формула (59) носит название „начало бесконечности“, но при наводке на начало бесконечности мы еще не можем получить плоскость S_1 , от которой таким образом все предметы изображаются резко. Это расстояние $S_\infty - S_1$ будет равно:

$$S_\infty - S_1 = \frac{2h}{2K} = \frac{S_\infty}{2}. \quad (60)$$

Следовательно нам остается определить S_1 из формулы (60), чтобы окончательно установить границу переднего плана, т. е. расстояние от объектива, начиная с которого все предметы получат резкое изображение на пластинке. Это расстояние определим из формулы (56):

$$S_1 = \frac{S_\infty 2h}{2h + S_\infty K}. \quad (61)$$

На рис. 152 представлена схема, объясняющая применение формул (59), (60) и (61).

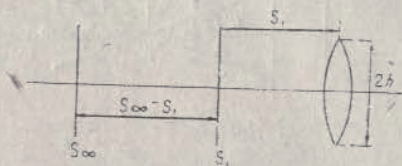


Рис. 152.

Плоскость S_∞ и будет служить плоскостью начала бесконечности; $2h$ равны отверстию объектива, а S_1 — расстояние от объектива, после которого все предметы до бесконечности дадут на пластинке удовлетворительное изображение.

Для практического определения глубины пространства обычно пользуются специально составленными таблицами для разных относительных отверстий объектива, вычисленными на основании приведенных выше формул.

Глава VII. Оптические добавления и насадки на фотокинообъективы

1. Применение дополнительных линз для увеличения или уменьшения изображения

Применение специального телеобъектива для любительской фотографии не всегда возможно как по техническим соображениям, так и вследствие значительной его стоимости. В то же время ряд так называемых несимметричных анастигматов („Тейлор“ и подражания ему) не может быть использован по отдельным элементам для увеличения изображения, как это имеет место в симметричных анастигматах типа „Дагор“. Следовательно в тех случаях, когда передвижение самого фотоаппарата по тем или иным соображениям затруднено, увеличение масштаба изображения возможно путем добавления на объектив насадочных линз.

Увеличение фокусного расстояния фотообъектива достигается, как нам известно, добавлением системы с отрицательным фокусным расстоянием. Для увеличения фокусных расстояний фотообъективов употребляются рассеивающие отрицательные линзы, надеваемые спереди на фотообъектив. Разумеется подобные линзы не должны ухудшать оптического качества фотообъектива, должны быть по возможности просты по конструкции и удобны при пользовании ими.

Путем целого ряда теоретических и практических работ доказано, что наиболее целесообразная форма насадочных для этой цели линз — это обычная форма простой очковой линзы, дающей в соединении с фотообъективом достаточно свободное от погрешностей изображение.

Величина погрешностей качества изображения фотообъективов при применении дополнительных рассеивающих линз в зависимости от их формы указана на рис. 154, 155 и 156. Приведенные кривые ошибок даются для комбинации объектива типа „Тессар“ 1:4,5 с $f=150$ мм, с насаженной на нем на расстоянии 2 мм от передней линзы объектива (рис. 153) дополнительной рассеивающей линзой с $f=-330$ мм, что дает в общей сложности комбинацию оптической системы с фокусным расстоянием в 250 мм. Числовые величины кривых указаны на рисунках для системы с общим $f=100$.

Рис. 154 дает кривые при пользовании „Тессаром“ с двояковогнутой отрицательной линзой, на рис. 155 — при том же объективе, но с плоско-вогнутой линзой.

Рис. 156 воспроизводит кривые aberrаций с выпукловогнутой линзой. По сравнению с кривыми рис. 154 и 155 ошибки комбинации с выпукловогнутой линзой значительно уменьшены.

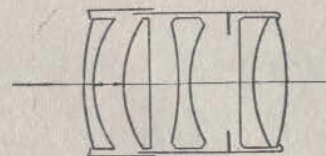


Рис. 153.

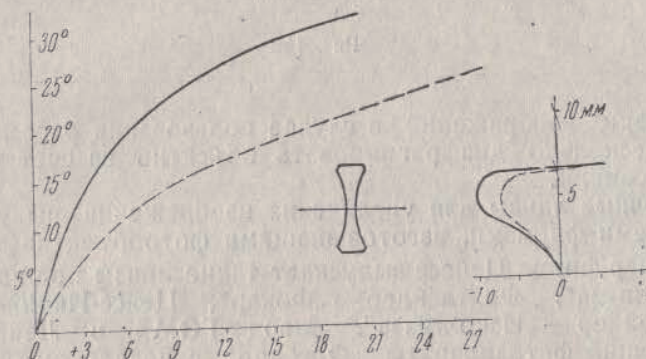


Рис. 154.

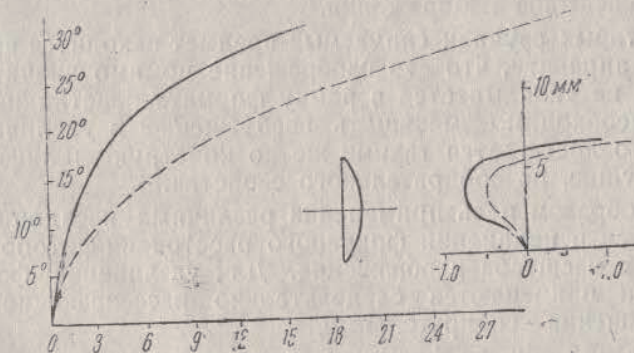


Рис. 155.

Сравнив кривые aberrаций объектива „Тессар“ (рис. 100) с кривыми этого же объектива, но с дополнительно насаженной рассеивающей линзой (рис. 156), мы обнаруживаем заметное ухудшение для крайних зон. Поэтому рекомендуется для получения

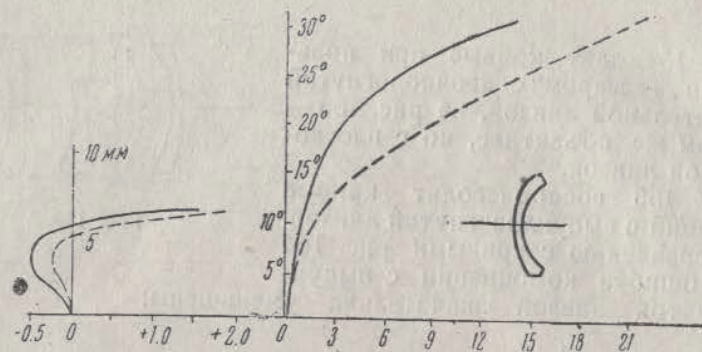


Рис. 156.

более резких изображений в случае пользования рассеивающей линзой несколько диафрагмировать объектив за счет увеличения экспозиции.

Насадочные линзы для увеличения изображения выпускаются почти всеми фирмами, изготовляющими фотообъективы.

Например фирма Цейсса выпускает такие линзы под названием „Дистар-линза“, Фохтлендер — „Фокар“, Цейсс-Икон — „Дельта“, Шнейдер — „Иско-линза“. Завод ГОМЗ в Ленинграде, выпускающий фотоаппараты „Фотокор“, в недалеком будущем также намечает выпуск в продажу насадочных линз для увеличения масштаба изображения.

В некоторых случаях снимаемый предмет находится настолько близко к аппарату, что его изображение помимо значительного масштаба не укладывается в рамку формата пластинки. В таких случаях необходимо уменьшить изображение и увеличить поле зрения, что достигается такими же по конструкции линзами, как и предыдущие, но собирательного свойства.

Таким образом цель применения различных насадочных линз заключается в изменении фокусного расстояния фотообъектива, а отсюда и масштаба изображения. Для увеличения фокусного расстояния применяются следовательно рассеивающие линзы, для уменьшения — собирательные.

Определение общего фокусного расстояния комбинации, состоящей из фотообъектива и насадочной линзы, а также и ее светосилы, может быть произведено двояко.

а) По ранее выведенной формуле:

$$F = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

где F — фокусное расстояние комбинации, f_1 и f_2 — фокусные расстояния насадочной линзы и данного объектива и d — расстояние между задней главной плоскостью насадочной линзы и передней плоскостью фотообъектива. Так как значение величин расстояния главных плоскостей не всегда известно фотокинооператору, то предлагается второй вариант определения общих фокусных расстояний по более простым элементам.

б) Оптическая сила некоторых систем иногда изображается величиной, обратной фокусному расстоянию, и выражается в диоптриях (D), где 1 диоптрия равна фокусному расстоянию системы в 1 м.

Следовательно, зная фокусное расстояние системы, нетрудно получить ее значение в диоптриях, и обратно. Так объектив с фокусным расстоянием в 130 мм будет равен: $1000:130 = 7,7D$, и обратно, линза в $10D$ будет иметь f равное 100 мм. Как уже известно, все собирательные системы считаются положительными, а рассеивающие — отрицательными; ввиду этого к обозначению D необходимо всегда прибавлять знак плюс или минус.

Применяя этот последний менее точный метод для нахождения общего фокусного расстояния нескольких оптических систем, нам нет надобности знать расстояние главных плоскостей; переводя значение отдельных систем в D , путем дальнейшего сложения найденных D определяем общую оптическую силу системы.

Пример. К анастигмату с $f = 150$ мм, отверстием 1:4,5, прибавлена насадочная рассеивающая линза с $f = 333$ мм. Находим общее фокусное расстояние:

$$1000:150 = +6,65; \quad 1000:-333 = -3;$$

складываем:

$$\begin{array}{r} +6,65 \\ -3,00 \\ \hline +3,65 \end{array}$$

что будет равно фокусному расстоянию $1000:3,65 = 273$ мм.

Нам остается найти светосилу этой общей комбинации; определяем, что отверстие 1:4,5 при $f = 150$ мм равняется 33,3 мм. Следовательно при $f = 273$ и диаметре объектива в 33,3 мм относительное отверстие системы будет равно 1:8,2, откуда и находим экспозицию.

Насадочные линзы — как собирательные, так и рассеивающие, изготовляются разных фокусных расстояний, причем некоторые фирмы (Цейсс) дают обозначение этих линз в D . Для практического пользования ими необходимо составить таблицу к определенному фотообъективу по вариантам а или б и вычислить время, потребное для экспозиции.

2. Насадочные линзы для получения мягкого рисунка

Весьма часто от фотообъектива требуют некоторой мягкости рисунка; это особенно необходимо в тех случаях, когда требуется большая глубина изображаемого пространства. В современных анастигматах получение такой мягкости невозможно вследствие хорошей коррекции объектива, дающего резкий, отчетливый снимок.

Для устранения этого „недостатка“ и получения художественно-мягких изображений применяют так называемые афокальные линзы. Эти линзы при насадке их на фотообъектив не изменяют его фокусного расстояния и действуют как плоскопараллельная пластинка.

Задача состоит в том, чтобы посредством надетой на объектив афокальной линзы несколько испортить коррекцию объектива, не нарушая кривизны поля изображения. Большого распространения эти линзы в фотографии не получили, но в киносъемке они пользуются успехом, особенно у американцев при съемке крупным планом.

Конструкция таких линз разнообразна, но есть некоторая типизация, говорящая о какой-то оптической схеме, повторяемой в различных конструкциях. В качестве образца приводим афокальную линзу Мерте (рис. 157), которой подражают американцы.

Как видно, линза состоит из трех зон: *A* — дает рассеивающую зону, *B* — зона плоскопараллельной пластинки и *B* — зона собирательного действия.

На рис. 158 приведен ход лучей через такую линзу.

Форма линзы Мерте, радиусы и ход лучей для наглядности сильно утрированы.

Особое преимущество линзы Мерте заключается в глубине изображаемого ею пространства.

Помимо употребления специальных линз, существуют фотообъективы, позволяющие получать также некоторую мягкость рисунка (см. „Гелиар“ Фохтлендера, стр. 111). Кроме того разработано очень большое количество различных приспособлений, надеваемых на объектив для уменьшения резкости изображения, основанных на общем принципе дифракции света.

К числу таких приспособлений относится плоскопараллельная пластинка, имеющая на поверхности особым способом нанесенный мат или ряд параллельных линий, нарезанных алмазом на стекле.

Отметим также употребление для этой цели шелковых сит, жалюзных диафрагм и пр.

3. Светофильтры

Назначение светофильтра — повышение правильной цветопередачи фотоэмульсией и увеличение контрастности отдельных цветов.

Оставляя в стороне вопросы сенсibilизации фотоэмульсии и применения ортохроматических и панхроматических пластинок и пленок, так как эти вопросы достаточно полно разбираются в специальных учебниках по фотографии, остановимся на светофильтре как добавочном включении в объектив и возможном тем самым нарушении коррекции объектива с точки зрения ухудшения оптического качества.

В фотографии применяются два рода фильтров — жидкие и сухие. Первые состоят из пары плоскопараллельных стеклянных пластинок, склеенных по бокам и снизу металлическими щечками; они представляют собой узкую кювету, в которую наливают цветную жидкость. Сухие же светофильтры изготовляются либо из окрашенного стекла, либо из обыкновенного стекла, но в этом случае между двумя такими стеклами прокладывают окрашенную пленку.

Оставляя в стороне спектрометрическое обоснование цветности светофильтров, их способность поглощать отдельные участки спектра и т. п., приходим к выводу, что к любому качеству светофильтра, жидкого или сухого, следует предъявлять одинаковые требования.

В самом деле, и те и другие светофильтры ограничивают стеклянными пластинками жидкое или сухое красящее вещество. Следовательно их следует рассматривать как стеклянные нейтральные по фокусу пластинки, не имеющие добавочного сферического действия. Поэтому основным требованием, которое следует предъявлять к светофильтрам, должно быть требование наличия у них плоскопараллельности. Требование в отношении плоскостности поверхностей фильтра обусловливается желанием избежать дополнительного сферического действия такой пластинки, которая повлечет ухудшение качества объектива. Соблюдение параллельности отдельных стекол светофильтра, плоскопараллельности светофильтра в целом, необходимо ввиду возможности появления некоторой окраски в случае, если светофильтр будет представлять собой клинообразную пластинку.

Хороший в отношении плоскопараллельности светофильтр не должен ни изменять фокусировку объектива, сделанную без светофильтра, ни смещать изображение на матовом стекле после надевания светофильтра на фотообъектив. Наличие последнего явления указывает на непараллельность сторон светофильтра.

На большинстве стандартных светофильтров указана цифрой так называемая кратность светофильтра. Она означает, что время

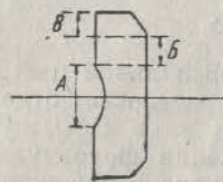


Рис. 157.

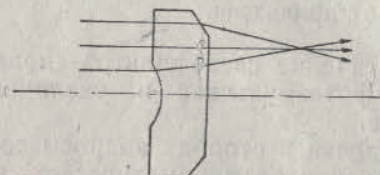


Рис. 158.

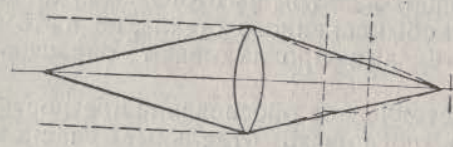


Рис. 159.

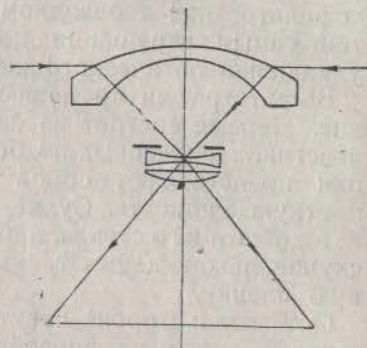


Рис. 160.

экспозиции со светофильтром необходимо увеличить пропорционально его кратности. Так светофильтр Фохтлендера „Альфа-2“ требует экспозиций, в два раза больших, чем без светофильтра, а светофильтр „Бета-5“ — в пять раз больше; однако кратность есть понятие относительное, значение которого изменяется в зависимости от цветочувствительности негативного материала.

4. Зеркала, призмы и прочие добавления

Для целей технической съемки иногда применяются зеркала или призмы, надеваемые на фотообъектив.

От зеркал требуется наличие правильной отражательной плоскости; что же касается всякого рода призм, то их следует рассматривать как плоскопараллельные пластинки со всеми вытекающими отсюда требованиями.

Отметим применение плоскопараллельной пластинки, помещаемой между объективом и фотопластинкой; она используется в камерах постоянного растяжения, где объектив и фотопластинка не передвигаются относительно друг друга. В этих камерах плоскость фотопластинки устанавливается по предмету, находя-

щемуся на переднем плане подлежащего съемке участка, а для съемки объектов, удаленных на бесконечность, включают упомянутую пластинку, компенсирующую разницу фокусных расстояний (рис. 159).

Для съемки облачности неба и для других научно-исследовательских работ, при которых не предъявляется строгих требований к качеству изображения, В. Н. Бонд изобрел мениск, который, будучи установлен перед объективом, дает возможность съемки с углом зрения в 180° (рис. 160).

На рис. 160 изображен мениск, приключенный к специальному объективу. Для устранения хроматизма съемка с таким мениском производится с помощью фильтра.

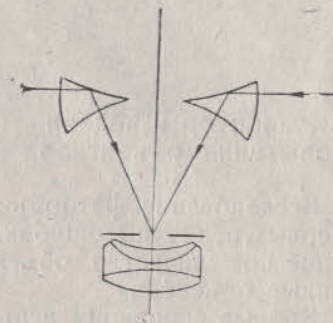


Рис. 161.

Для панорамной съемки на полные 360° употребляется зеркальное кольцо, представленное на рис. 161. Разумеется, качество изображения такого рода съемки весьма невысоко, и изображения получаются в непривычной перспективе; все же такого рода добавления употребляются за границей для фотографирования на больших строительных площадках. Рис. 161 поясняет ход лучей: вначале луч проходит первую поверхность кольца и, отразившись от второй, проходит третью поверхность и наконец попадает в фотообъектив. Приспособление это довольно дорогое, изготовление его связано с большими трудностями.

1. Характер и задачи испытания объективов

Исследование фотообъективов имеет целью определить, во-первых, величины ошибок и aberrаций и тем самым выявить оптическое качество объектива и, во-вторых, установить постоянные объектива.

Кривые aberrации испытуемого объектива, выведенные на основании тригонометрического просчета всей системы, еще ничего не говорят о его качестве, так как в процессе производства объективов имеет место ряд отступлений от заданных радиусов кривизны, показателей преломления, толщин линз, воздушных промежутков и пр. Хотя методы производства и контроля, применяемые в оптической промышленности, считаются самыми точными, однако отступления в тех или иных элементах оптической системы имеют место.

Упомянутые отступления следует приписать неоднородности оптического стекла, некоторой неточности изготовления пробного стекла, по которому принимаются отдельные линзы фотообъектива, уменьшению или увеличению толщины линзы в центре и пр. Кроме того правильно изготовленный фотообъектив может быть испорчен в процессе сборки от недостаточно точной центровки всей системы объектива и несоблюдения заданных воздушных промежутков между отдельными линзами.

Если все недостатки объектива принять за 100%, то 75% этих недостатков следует всегда отнести за счет неправильной сборки.

Конечная цель каждого объектива—дать достаточную резкость и четкость изображения при хорошей разрешительной способности. Влияние же отдельных aberrаций и ошибок объектива на качество изображения пока еще не изучено полностью, и следовательно в основном испытание объектива сводится к определению разрешающей силы и качества изображения.

Описание испытания фотообъективов будет дано нами в трех вариантах: первое испытание—в условиях лабораторной практики, второе—в условиях обычной нелабораторной обстановки и третье—стандартный метод испытания.

Так как все фотообъективы вделаны в соответствующие оправы, то прежде, чем приступить к оптическому испытанию фо-

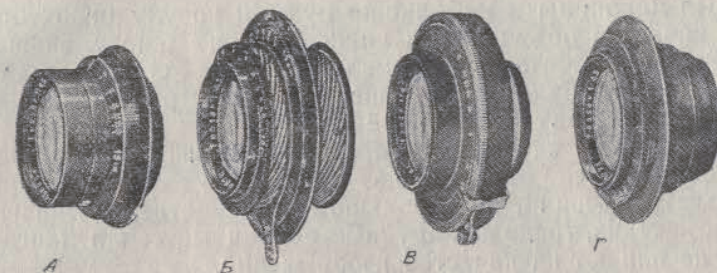


Рис. 162.

тообъективов, необходимо удостовериться в исправности оправы, затвора и диафрагмы.

Большинство современных объективов монтируется в оправы одного из четырех основных типов, представленных на рис. 162.

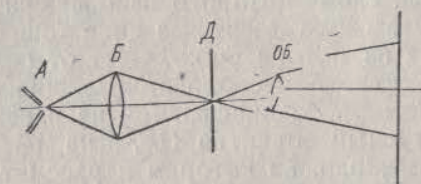


Рис. 163.

На рис. 162, а, изображена нормальная оправа, употребляющаяся для камер с переменным растяжением; оправа б, представляющая собой червячную оправу, употребляемую в аппаратах с постоянным растяжением, в частности в кино съемочных аппаратах; в—наиболее распространенный тип оправы с затвором и г—так называемая углубленная оправа, применяемая часто в зеркальных камерах.

Каждая из указанных оправ состоит из средней части, в которую ввинчены передняя и задняя части объектива.

При осмотре оправы необходимо удостовериться в том, что отдельные части объектива соединены плотно и не шатаются и что помещенная в средней части оправы каждого объектива ирисовая диафрагма вращается плавно, без особых усилий. Отдельные пластинки ирисовой диафрагмы должны плотно перекрывать друг друга; образование между ними видимого в просвет зазора абсолютно недопустимо.

На внутренних частях оправы объектива ни в коем случае не должно быть ржавчины или налета.

Убедившись в удовлетворительном состоянии оправы, приступают к оптическому испытанию объектива.

2. Лабораторный метод испытания объективов

Прежде всего объектив исследуется в отношении чистоты (отсутствия царапин) полированных поверхностей отдельных линз, наличия свилей и пузырей в оптическом стекле и натяжения.

Отдельные царапины и небольшие пузыри не ухудшают оптического качества объектива, а лишь незначительно уменьшают его светосилу. Считается нормальным, если количество пузырей в объективе будет не больше, чем 1 пузырь диаметром до 0,8 мм на 2 см² оптического стекла.

Влияние свилей на качество изображения до настоящего времени еще недостаточно изучено. Бесспорно лишь одно, — что мелкие, еле заметные свиля, но в большом количестве, ухудшают качество объектива, тогда как крупные единичные свиля иногда несколько не влияют на качество изображения.

Испытание на царапины и свиля производится с помощью прибора, схема которого изображена на рис. 163.

Эта схема носит название точечной теневой проекции и основана на методе Фуко. Свет от сильного источника *A* падает на объектив *B* и собирается на диафрагме *D* с малым круглым отверстием. За диафрагмой на расстоянии 250 мм помещается испытуемый объектив *OB*, а на расстоянии 500 мм устанавливается экран, на котором и рассматривается теневое изображение объектива.

Свиля и царапины выступают на экране в виде более или менее резких полос, светлее или темнее окружающего фона.

Фотообъектив считается удовлетворительным, если при описанной установке с диафрагмой в 1 мм на экране не будут заметны царапины и свиля.

Исследование на натяжение производится на поляризационных приборах. Натяжение в объективе может происходить от остаточного напряжения в стекле как результат плохого его отжига, а также вследствие слишком сильного сдавливания линзы при закреплении ее в оправе. Наличие натяжения в стекле, указывающее на его неоднородность, вызывает двупреломление и сильно портит качество изображения объектива.

Поляризационные приборы для определения натяжений в системах, подобных фотообъективу, основаны на методе чувствительной окраски. Обычно рассматриваемое поле зрения подобного поляризационного прибора имеет ровную однотонную (розовую) окраску, но стоит только на пути хода поляризованных лучей поставить фотообъектив с натяжением, как немедленно изменяется окраска поля зрения прибора в тех местах, где сосредоточено напряжение в стекле. Появление того или иного цвета говорит о силе внутреннего напряжения.

Считают, что фотообъектив не имеет натяжения, если не изменяется окраска поля зрения поляризационного прибора. В противном случае объектив должен быть безусловно забракован. Такое жесткое требование объясняется тем, что остаточное напряжение в объективе при съемке в разных температурных ус-

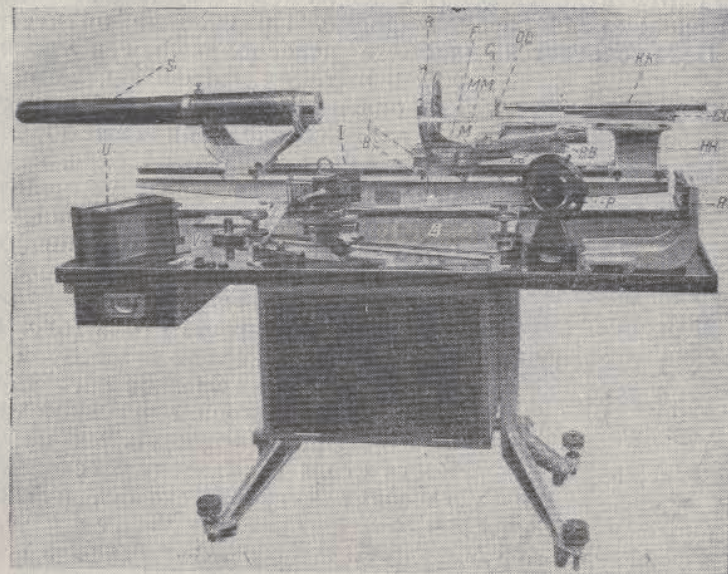


Рис. 164.

ловиях резко деформирует поверхности линз и быстро выводит объектив из строя.

Дальнейшее испытание фотообъектива производится в отношении:

- 1) определения диаметра входного зрачка, или входной диафрагмы;
- 2) промера величины фокусного расстояния объектива;
- 3) определения остаточных аберраций сферических и хроматических;
- 4) оценки качества изображения фотообъектива и
- 5) определения величины разрешительной способности объектива.

Упомянутые выше испытания, где бы таковые ни производились, чаще всего основаны на применении метода исследования объективов по способу Гартмана, с различного рода добавлениями и изменениями. Указанный метод исследования считается вполне достаточным для оценки качественной стороны фотообъективов.

Для исследования фотообъективов указанным выше методом Гартмана выпущены специальные приборы, называемые оптическими скамьями. Их изготовляют две фирмы: фирма „Аскания“ (бывш. „Бамберг“) в Германии, производящая оптическую скамью

точно по Гартману, и фирма А. Бека (Лондон), выпускающая скамью в несколько измененной форме. Применение оптической скамьи Бека считается наиболее целесообразным и удобным

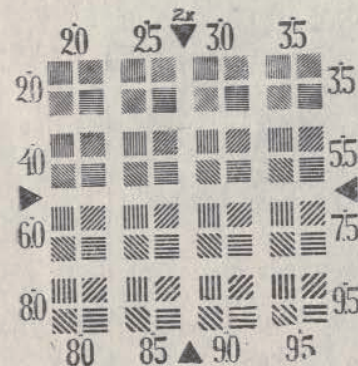


Рис. 165.

для испытания фотообъективов, так как она предназначена исключительно для исследования фотообъективов и имеет приспособления и принадлежности для любых испытаний.

Прежде чем перейти к описанию отдельных этапов испытания объективов, ознакомимся вкратце с оптической скамьей Бека.

Скамья состоит из стола (рис. 164) с деревянным верхом и шкафом для хранения принадлежностей, укрепленными на прочной чугунной стойке с четырьмя ножками. На поверхности стола находится массивная оптическая чугунная скамья, на кото-

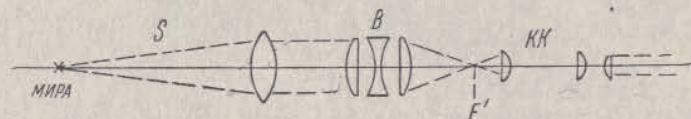


Рис. 166.

рой монтированы различные принадлежности для исследования фотообъективов.

В основном оптическая скамья состоит из следующих трех приборов:

1) *S* — коллиматора, состоящего из длиннофокусного объектива (на скамье Бека f равно 840 мм), в фокусе которого установлена так называемая мира — испытательная таблица (рис. 165);

2) *B* — оправы, в которой укрепляется испытуемый объектив, и

3) *K* и *KK* — микроскопов, служащих для рассматривания и оценки качества изображения испытуемого фотообъектива.

Действие прибора во всех случаях исследования аберраций, качества изображения и разрешительной способности фотообъектива основано на следующей оптической схеме: мира коллиматора, установленная в фокусе объектива и освещенная источником света (рис. 166), посылает пучок параллельных лучей на испытуемый фотообъектив, укрепленный в оправе. Пройдя фотообъектив, лучи собирают в фокальной плоскости изображение мира, которое и рассматривается с помощью микроскопа.

Скамья Бека имеет два микроскопа: первый — отмеченный на рис. 164 буквами *KK*, и второй — монтированный на поперечной рейке *A* (рис. 164). Последний микроскоп является наиболее употребительным; в него могут быть ввинчены любые по увеличению объективы и окуляры, что дает возможность исследовать качество изображения фотообъективов разных фокусных расстояний (в пределах от 20 до 450 мм).

Переходим к описанию исследования фотообъективов.

Определение диаметра входного отверстия фотообъектива

Укрепив испытуемый фотообъектив в оправу *B* (рис. 164), пропускаем через него пучок параллельных лучей из коллиматора *S* и находим фокальную плоскость при помощи микроскопа *KK*. Затем, укрепив вместо матового стекла в рамке *DD* пластинку с малым отверстием, снимаем микроскоп *KK* и освещаем пластинку сильным источником света. Поместив теперь между фотообъективом и коллиматором ирисовую диафрагму *P* с укрепленным в ней матовым стеклом, получим на последнем освещенный круглый диск, соответствующий диаметру пучка параллельных лучей, который при нормальных условиях прошел бы фотообъектив и образовал в фокальной плоскости его изображение.

Для определения величины диаметра освещенного диска необходимо постепенно закрывать ирисовую диафрагму, пока она в точности не совпадет с диаметром диска на матовом стекле. Величину диаметра освещенного диска мы прочтем на оправе ирисовой диафрагмы, разделенной на миллиметры. Эта величина и будет выражать диаметр входного отверстия фотообъектива.

Определение эквивалентности фокусного расстояния фотообъектива

Определить величину фокусного расстояния фотообъектива необходимо, во-первых, для выяснения масштаба изображения и, во-вторых, для точного расчета относительного отверстия объектива.

Существуют два способа определения эквивалентного фокусного расстояния.

Первый способ — способ нахождения главной плоскости — сводится к следующему: укрепив испытуемый объектив в оправу *B*, при помощи микроскопа *KK* рассматривают изображение мира коллиматора *S* в фокальной плоскости объектива. Если теперь слегка качнуть оправу *B* в горизонтальной плоскости на 10—15° (оправа *B* вращается на оси *E*), то изображение, даваемое объективом, или уйдет из поля зрения микроскопа, или останется на месте. В том случае, если изображение будет уходить, необходимо изменить несколько положение оправы *B* на оси *E* и

повторять это до тех пор, пока, вращая оправу *B*, мы не обнаружим, что смещение изображения в микроскопе прекратится.

При этом ось вращения оправы *B* как раз совпадает с задней главной плоскостью объектива, и нам останется лишь промерить это расстояние. Так как отсчеты величин фокусных расстояний на скамье Бека производятся от оси вращения *E* оправы *B*, то следовательно при установке задней главной плоскости испытуемого объектива в плоскость вращения *E* измеряемое расстояние от оси *E* до фокальной плоскости *DD* даст нам величину заднего главного *f* системы.

Этот метод измерения эквивалентного фокусного расстояния системы дает нам точность в пределах 0,5—0,8 мм при условии пользования желтым светофильтром.

Перейдем ко второму способу определения эквивалентного фокусного расстояния—способу измерения фокусных расстояний, основанному на принципе увеличения (Аббе).

Поместив в фокальной плоскости коллиматора *S* вместо мира шкалу, предварительно проверенную на компараторе, и установив испытуемый объектив обычным способом в оправу *B*, рассматривают изображение шкалы с помощью микроскопа, установленного на поперечной рейке *A* (рис. 164).

Если величина отдельных штрихов шкалы равна *y*, фокусное расстояние коллиматора равно *F*, фокусное расстояние исследуемого объектива равно *f'* и величина изображения шкалы—*y'*, то

$$\frac{y}{F} = \frac{y'}{f'};$$

отсюда искомое фокусное расстояние объектива:

$$f' = \frac{F}{y} \cdot y'.$$

Величины *y* и *F* нам известны. Величину изображения *y'* мы определяем микроскопом и из приведенной формулы находим эквивалентное фокусное расстояние объектива.

Этот способ в случае отсутствия в испытуемом объективе апланатизма дает большую точность измерения фокусного расстояния объектива. Рекомендуются и при этом способе пользоваться светофильтром.

Определив диаметр входного отверстия объектива и его фокусное расстояние, находим и его светосилу по формуле (51).

Определение сферической и хроматической aberrаций

Величина сферической aberrации в собственном смысле слова, как это было указано на стр. 50, определяется разностью

фокусных расстояний фотообъектива, полученных при прохождении параллельного пучка лучей через объектив на разной высоте *h*. Таким образом методика испытания на сферическую aberrацию объектива на скамье Бека сводится к промеру тем или иным способом фокусных расстояний при разных положениях специальной диафрагмы *P*, закрывающей объектив на какой-либо высоте.

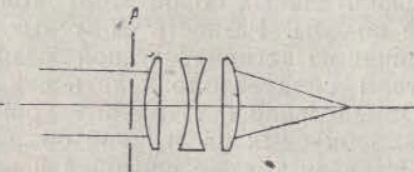


Рис. 167.

Для этой цели диафрагма *P* устанавливается между коллиматором *S* и оправой объектива *B*. Открыв диафрагму до полного отверстия объектива, среднюю его часть закрывают круглой блендой меньшего, чем это отверстие, размера, так, чтобы между краем диафрагмы и краем бленды оставался зазор в 3—4 мм. Тогда свет из коллиматора *S* проходит в объектив через узкую щель в 3—4 мм на определенной высоте *h* (рис. 167).

После того как будет промерено фокусное расстояние при прохождении лучей через крайнюю зону, уменьшают диафрагму и бленду, сохраняя всюду разницу между диаметрами в 3—4 мм, и измеряют таким же способом фокусное расстояние лучей другой зоны и т. д. Разница фокусных расстояний и будет служить мерой продольной сферической aberrации. Разумеется, обязательно пользование фильтром.

Исследование сферических aberrаций типа астигматизма и комы производится обычным методом промера фокусных расстояний, но в этом случае лучи падают на объектив под некоторым определенным углом.

В наших предыдущих описаниях выверки объектива предполагалось, что параллельный пучок лучей из коллиматора попадал на испытуемый объектив параллельно его оптической оси.

В случае комы оправа объектива *B* вместе с суппортом *L* поворачивается на вертикальной оси *E* (рис. 164) и создает по отношению оси коллиматора *S* некоторый угол. Этим самым достигается условие входа в объектив пучка параллельных лучей под заданным углом. Суппорт оправы *B* может вращаться в пределах 180°; закрепление и отсчет его могут быть произведены через каждый градус.

Поворачивая испытуемый фотообъектив на тот или иной угол и производя замер фокусного расстояния, можем на основе полученных величин составить кривую каустики (см стр. 55).

Точно так же испытание производится и в отношении астигматизма. Повернув на определенный угол суппорт с испытуемым фотообъективом, наводим микроскоп сначала на резкость горизонтальных полос миры коллиматора, потом на вертикальные полосы. Разность фокусных расстояний и будет служить величиною астигматической разности для данного угла. Астигматизм следует определять для всего поля зрения объектива.

Определение остаточного хроматизма заключается в измерениях фокусных расстояний объектива для различных цветов.

Оставляя тот же способ для измерения фокусного расстояния от задней главной плоскости, какой применялся для определения сферической аберрации, мы лишь производим измерение в строго определенных монохроматических цветах.

Для этой цели употребляются сухие или жидкие светофильтры, которые вставляются на пути хода лучей из коллиматора в объектив.

Произведя например промер фокусного расстояния с красным светофильтром, ставят после него синий, дальше фиолетовый и т. д.

Разность фокусных расстояний и даст нам остаточный хроматизм.

Оценка качества изображения и разрешающей способности

Теперь перейдем к основному методу испытания фотообъектива—к оценке качества его изображения и разрешающей силы. И то и другое предусмотрено для исследования на скамье Бека.

Мы неоднократно отмечали, что производить оценку качества объектива на основе величин остаточных аберраций совершенно недостаточно. Точная связь между величинами аберраций и качеством изображения объектива еще мало изучена и численно не установлена.

Следовательно испытание качества изображения по существу должно считаться самым важным исследованием фотообъектива.

Оценка качества изображения и разрешающей силы производится с помощью миры, изображенной на рис. 165 и состоящей из квадратов с черными и белыми параллельными полосами одинаковой ширины в каждом квадрате, расположенными в различных направлениях.

Ширина полос, всегда оставаясь равной для черных и белых полос, изменяется от квадрата к квадрату. Расстояние между центрами полос, выраженное в угловой мере, обозначено у каждого квадрата в секундах.

Установив фотообъектив и осветив миру, микроскопом рассматривают ее изображение в фокальной плоскости объектива.

Хорошо коррегированный объектив типа анастигмата при полной диафрагме должен давать резкое изображение миры на совершенно черном фоне, без ореола, белесоватого фона, без двойников окраски и искажения рисунка миры.

Белесоватый фон неодинаковой яркости получается тогда, когда падающий из объектива свет не концентрируется в фокальной плоскости, а рассеивается по всему полю зрения. Ореолом называют некоторое рассеяние света вокруг изображения объекта, в результате которого граница раздела не очерчена резко, а несколько размыта. Этот недостаток является весьма существенным в фотообъективе.

Что же касается двойников,

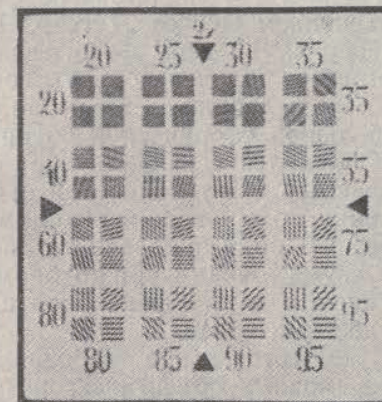


Рис. 168.

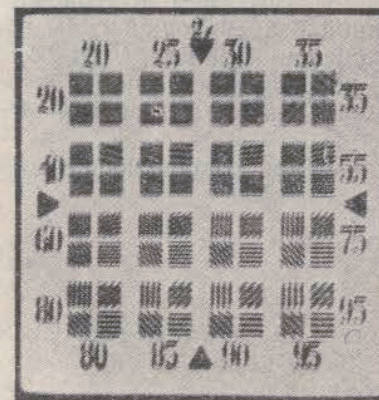


Рис. 169 (лев.).

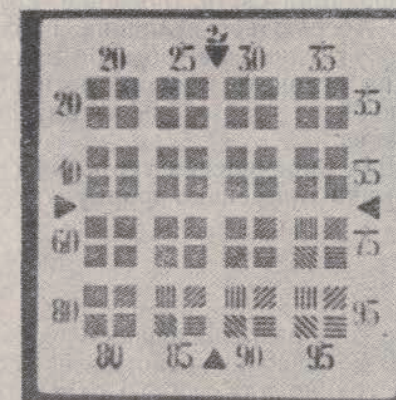


Рис. 169 (прав.).

то их образование следует рассматривать как результат несовершенной центрировки оптической системы фотообъектива. Двойники, побочные изображения, подобные по масштабу основному, менее ярки, чем основное изображение, и несколько смещены относительно последнего.

Наличие у краев изображения предмета цветной каймы указывает на остаточную хроматическую аберрацию. Так как образование ореолов говорит нам о наличии сферической аберрации,

то интересно проследить, при какой диафрагме исчезают ореолы, чтобы знать величину отверстия объектива, исправленного в отношении сферической аберрации.

На рис. 168 представлена фотография миры (рис. 165), снятая объективом Цейсса „Тессар“ 1:4,5.

На рис. 169 даны фотографии той же миры, причем левая фотография получена объективом, у которого значительны астигматизм и двойники, а правая фотография получена объективом с большой сферической аберрацией.

Определение разрешающей силы в фотообъективах, предназначенных для технической съемки (репродукционные) и аэро-съемки, совершенно необходимо. Под разрешающей силой объектива мы подразумеваем то наименьшее угловое расстояние между двумя точками, при котором объектив еще в состоянии их разрешить и дать в фокальной плоскости изображение в виде двух отдельных точек.

Разумеется, такое требование весьма ценно, скажем, в аэрофото-съемочных объективах, назначение которых—дать изображение мельчайших деталей объекта.

Теоретически разрешающая сила фотообъектива основана на дифракции света, описание которой мы опускаем в этой книге. Абсолютная величина наблюдаемой разрешающей силы фотообъектива сама по себе никакого значения не имеет. Необходимо сравнить ее с теоретической разрешающей силой, выведенной из теории дифракции света для данного отверстия объектива.

Для определения теоретического значения разрешающей силы обычно применяют формулу:

$$E'' = \frac{140}{D}, \quad (61)$$

где E'' —разрешающая сила объектива и D —диаметр его. Число 140 найдено на основании теории дифракционных кружков и постоянно для любого отверстия объектива.

Таким образом разрешающая сила фотообъектива зависит от его диаметра. Если объектив обладает остаточной сферической аберрацией, не превосходящей некоторых пределов, то разрешающая сила фотообъектива почти не уменьшается (по сравнению с теоретической) и формула (61) сохраняет свое значение.

Определив на основании формулы (61) теоретическую разрешающую силу испытуемого фотообъектива, устанавливают его на скамье Бека и производят поверочное определение фактической разрешающей способности.

Критерием разрешающей силы объектива служит тот квад-

рат, у которого можно свободно различать светлые и темные полосы, расположенные в разных квадратах по различным направлениям, и может быть определено их количество. В случае астигматизма, при хорошей разрешающей способности горизонтальных полос данного квадрата, вертикальные полосы смыты и не разрешаются объективом. В этом случае замечают числа свободно различаемых полос у квадрата горизонтальных полос и у квадрата вертикальных полос. Разница в числах даст нам величину астигматизма, выраженную в секундах.

Так, если горизонтальные полосы разрешались фотообъективом у квадрата в $5''$, а вертикальные у квадрата в $7''$, то астигматизм равен $7-5=2''$. Рассматривание изображения объектива микроскопом принципиально не имеет никакого преимущества перед применением обычной лупы и не приносит никакой пользы в смысле увеличения разрешающей способности.

Сравнение разрешающей способности объектива, выведенной на основании формулы (61), с разрешающей способностью, определенной на оптической скамье, дает окончательную оценку качества объектива как в отношении его разрешающей силы, так и в смысле качества изображения.

Перечисленные основные элементы испытания фотообъективов и представляют собой методику исследования объективов на оптических скамьях.

Чтобы закончить раздел лабораторных методов испытания объектива, отметим очень интересный метод испытания фотообъективов, предложенный Ветгауером. Метод этот интересен тем, что он дает качественную и количественную оценку испытуемого объектива путем фотографирования специальной миры Ветгауера (рис. 170).

На рис. 171 представлена фотография миры Ветгауера, снятая фотообъективом по методу Ветгауера, причем каждая отдельная маленькая фотография миры снята при разных наклонах испытуемого фотообъектива.

Рис. 171 дает яркое представление об ошибках фотообъектива как в отношении кривизны изображения, так и присутствия комы по несимметрии изображений вертикальных и горизонтальных линий миры.

В самое последнее время Твайман предложил интерференционный метод исследования ошибок фотообъектива; этим способом обнаруживают сферическую аберрацию в весьма наглядной форме.

3. Испытание фотообъективов непосредственно в фотоаппарате

Можно сделать относительно точное испытание фотообъектива, находящегося в фотоаппарате, и без особых специальных

приборов или приспособлений, пользуясь лишь листом ватманской бумаги, очковой линзой и обычной фотографической лупой.

В качестве объекта часто стараются найти предмет, значительно удаленный (находящийся в бесконечности) и достаточно удобный в отношении конфигурации. Так как это не всегда удается, то рекомендуется в качестве объекта пользоваться чертежом мира (рис. 165), воспроизведенной тушью на ватманском листе. Чтобы установить такой чертеж в бесконечности, необходимо иметь одну очковую линзу в $+0,25 D$, которую и насаживают с помощью воска на

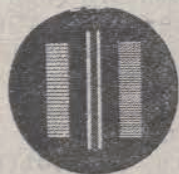


Рис. 170.



Рис. 171.

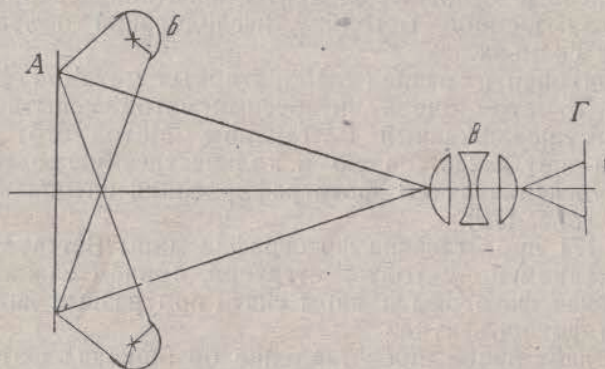


Рис. 172.

входное отверстие фотообъектива. Поместив на расстоянии 4 м от объектива упомянутый чертеж, мы следовательно будем иметь его в фокусе очковой линзы ($0,25 D = 4 м$), что дает по выходе из нее параллельный пучок лучей.

Разумеется, отдельные квадраты мира следует вычертить в определенной угловой величине, относя ее к фокусному расстоянию линзы в 4 м.

Укрепив и хорошо осветив чертеж мира, можно приступить к испытанию фотообъектива в отношении качества изображения.

разрешающей силы и определения фокусного расстояния. Вследствие того, что матовое стекло фотоаппарата значительно уменьшает резкость и яркость изображения предмета, рекомендуется для упомянутых испытаний вместо матового стекла ставить обычное чистое стекло пластинки с удаленной эмульсией. Такое стекло не будет фиксировать изображение предмета, и нужно оно исключительно для упора края лупы, которой и рассматривается изображение мира.

Наводка на резкость в этом случае производится непосредственно лупой, т. е. стекло с прижатой к нему лупой перемещают до тех пор, пока не получат отчетливого и резкого изображения черных и светлых полос.

Оценка качества и разрешающей силы производится так же, как это было указано выше.

Определение величины фокусного расстояния объектива в камерах с двойным растяжением меха крайне несложно. Сделав наводку на резкость в плоскости стекла от бесконечно удаленного предмета (в нашем случае—мира) и отметив положение стекла, удаляют надетую на объектив очковую линзу. Перед объективом на его двойном фокусном расстоянии помещают небольшую линейку, разделенную на миллиметры. Приложив к заднему стеклу фотоаппарата второй экземпляр такой же линейки, добиваются совмещения резкости изображения линеек, когда их масштабы в точности совпадут друг с другом, т. е. изображение линейки предмета будет одинаково по масштабу с линейкой, приложенной к стеклу.

Если это достигнуто, то объект и его изображение находятся на двойном фокусном расстоянии. Так как мы предварительно отметили положение плоскости заднего стекла, когда аппарат был сфокусирован от бесконечно удаленного предмета, то, измерив теперь расстояние от этой точки до стекла, установленного на двойном фокусном расстоянии, получим величину эквивалентного фокусного расстояния объектива от задней его главной плоскости.

Чтобы избежать ошибки от неправильной фокусировки лупы, необходимо ее установить точно на фокус передней (от объектива) стороны прозрачного стекла, для чего на этой стороне стекла делают несколько царапин алмазом, по которым фокусируется лупа.

4. Стандартный метод испытания объективов

Мы уже упоминали, что основным элементом испытания фотообъективов является определение качества изображения и их разрешающей способности. Эти два элемента испытания и

являются стандартным методом исследования фотообъективов на большинстве оптических заводов.

Как правило, каждый сложный фотообъектив типа анастигмат проверяется заводом, прежде чем он будет выпущен на рынок; в этом случае необходим следовательно такой метод испытания, который, с одной стороны, гарантировал бы качественную сторону испытания, с другой — не требовал бы много времени и был по возможности прост.

На основании ряда лет работы заводских лабораторий оптических заводов по испытанию фотообъективов выработался определенный стандартный метод их испытания, принятый всеми оптическими заводами.

Описание такого стандартного метода и дается ниже. В основном метод испытания состоит в фотографировании особой большой таблицы испытуемым объективом; полученный таким образом снимок исследуют и по результатам исследования судят о качестве объектива.

Схема расположения установки дается на рис. 172. На щите *A* наклеены в соответствующем порядке отдельные таблицы с рисунками, подобными тем, что изображены на рис. 165 (с разными вариациями); размеры самого щита должны быть достаточно велики, чтобы давать возможность проводить испытание самых широкоугольных объективов.

Для равномерного освещения щита устроены софиты *B*, дающие свет определенной и постоянной яркости. Вправо от экрана показан испытуемый фотообъектив *B*, дающий в фокальной плоскости *Г* изображение таблиц, наклеенных на щите.

Объектив, подлежащий исследованию, монтируется в специальной камере, передвигающуюся взад и вперед по отношению к щиту.

Так как в геометрической оптике ход лучей в оптическую систему всегда принят в виде пучка параллельных лучей, то такой щит следовало бы отнести в бесконечность. Однако в лабораторной практике ограничиваются расстоянием щита до объектива, равным 50-кратному фокусному расстоянию испытуемого объектива.

Испытание вышеуказанным методом сводится к установке фотообъектива в камеру, наводке с помощью лупы на резкость изображения таблиц на щите и непосредственному их фотографированию. Изучение снимка должно вестись на основе наших указаний, приведенных в разделе о лабораторных методах испытания объективов.

Само собою разумеется, что изображение, даваемое испытуемым объективом, может быть не только сфотографировано, но и рассмотрено при помощи микроскопа или лупы.

В указанном методе наибольшей трудностью является изготовление испытательного щита, на котором необходимо наклеить таблицы одинакового масштаба в порядке, обеспечивающем испытание всего поля зрения в отношении как аберраций, так и разрешающей способности. Освещение щита должно производиться не только сбоку, но и сверху.

Задачи и примеры к VIII главе

1. При исследовании свилей в оптическом стекле можно обнаружить и царапины. Каким образом отличить свиль от царапины?
2. Почему натяжение в оптическом стекле ухудшает качество изображения объектива?
3. Чем объяснить, что лучи из коллиматора оптической скамьи выходят параллельным пучком?
4. Могут ли воздушные пузырьки в стекле объектива ухудшить его качество?
5. Какое относительное отверстие будет в объективе, если его входное отверстие равно 30 мм, а $f' = 150$ мм?
6. Зная эквивалентное фокусное расстояние объектива, как узнать, в каком месте находится главная задняя плоскость объектива?

Для этого нужно промерить вершинное фокусное расстояние этого же объектива, а вершинным фокусным расстоянием мы называем расстояние от последней поверхности объектива до главной фокальной плоскости. Определив это расстояние, вычтем его из f' , и полученный остаток укажет нам положение задней плоскости. Например: $f' = 245$ мм, вершинное фокусное расстояние равно 232 мм, — следовательно задняя главная плоскость объектива будет находиться влево от последней поверхности объектива на расстоянии $245 - 232 = 13$ мм.

7. Почему предпочитают пользование монохроматическим светом при испытании объектива на сферическую аберрацию?
 8. Какова должна быть разрешительная способность объектива диаметром в 50 мм?
 9. Можно ли увеличить разрешающую силу объектива, если рассматривать его изображение сильным микроскопом?
- Нет, так как в этом случае мы обнаружим лишь отдельные детали изображения, не видимые простым глазом, но не сможем увеличить разрешающей способности объектива.
10. Влияет ли величина фокусного расстояния объектива на его разрешающую способность?
 11. Чем объяснить окрашивание краев предмета в красный и яблочно-зеленый цвет при наличии достаточно резкой картины и хорошего качества изображения?

В данном случае мы имеем объектив, у которого налицо вторичный спектр.

12. Как называются объективы, у которых устранен вторичный спектр?

13. Если при испытании объектива получается общий вялый тон изображения при хорошей разрешающей способности и отсутствии хроматизма, необходимо проверить чистоту стекол объектива — нет ли на них пятен и грязи.

14. Какому недостатку следует приписать образование бликов в фокальной плоскости объектива?

Москва — Павшино, 1935 г.

Приложения

1. Правила ухода и хранения фотообъективов

Если конструкция фотоаппарата позволяет быстро и свободно вынимать и вставлять фотообъектив, то следует всегда, как правило, такой объектив хранить в футляре, когда фотоаппарат не работает, и не оставлять его в камере.

Необходимо тщательно оберегать объектив от пыли, являющейся главным фактором разрушения стекла; удалять пыль следует чистой кисточкой, после чего рекомендуется слегка протереть линзы объектива, если это необходимо, мягкой стираной полотняной тряпочкой. Пользоваться замшей категорически воспрещается, так как в кожу замши западают крупные механические частички и, оставаясь там, наносят царапины на линзы объектива при протирке последних. Следует по возможности чаще менять полотняную тряпочку. Нужно помнить, что, чем реже мы протираем линзы объектива, тем меньше их царапаем.

Некоторые сорта оптических стекол, употребляемых для изготовления фотообъективов, весьма чувствительны к прикосновению пальцев, в результате чего возможно образование налета на полированной поверхности линзы.

В процессе эксплуатации объектива неизбежно образование на линзах, в особенности на передней линзе, некоторого налета, иногда в виде маслянистой пленки, иногда же в форме цветной радужной каймы по всей поверхности линзы. В этих случаях необходимо линзы объектива протереть тряпкой, смоченной в спирте. Не следует тряпку смачивать спиртом обильно, так как излишки спирта могут пройти под оправу стекла и начать разрушение бальзама, которым склеиваются отдельные линзы объектива. По этой же причине не допускается протирание линз эфиром ввиду его чрезвычайной активности в разрушении бальзама. Если налет с поверхности стекла от спирта не сходит, то можно протереть линзу слабым раствором уксусной кислоты (0,5%); если и после этого налет останется на стекле, то удаление его возможно только полировкой.

Развинчивать и разбирать объектив без особой нужды не рекомендуется, и только в крайнем случае допускается разборка объектива при обязательном условии совершенно точной сборки отдельных линз. Надо особо тщательно заботиться о том, чтобы при свинчивании линзы были вновь верно посажены на свое место и до конца, так как невыполнение этого условия нарушает центровку системы и ухудшает качество объектива.

Сводная таблица наиболее распространенных иностранных фотокинообъективов

№ по пор.	Наименование фирмы	Название объектива	Относительное отверстие	Фокусное расстояние (в см)	Примечание
1	Carl Zeiss, Jena	Tessar	1:2,7	1,5—5	Для кино-съемок
2		Tessar	1:2,8	5—7,5	
3		Tessar	1:3,5	2,8—7,5	
4		Tessar	1:3,5	5—30	
5		Tessar	1:4,5	4—50	Для кино-съемок
6		Tessar	1:5	50 и 70	
7		Tessar	1:6,3	7,5—60	
8		Biotessar	1:2,8	13,5 и 16,5	
9		Protar	1:18	4—27	Для кино-съемок
10		Protarlinse	1:12,5	18—69	
11		Doppel-Protar	1:6,3 и 1:7,7	10,5—40	
12		Biotar	1:1,4	2—7	
13		Biotar	1:2	4,5	Для кино-съемок
14		Triotar	1:3,5	3,5—21	
15		Triplet	1:4,8	50 и 70	
16		Apo Tessar	1:9	24—120	
17		Apo-Planar	1:7,5 и 1:12,5	41—170	Для ультра-съемки
18		Quarz-Anastigmat	1:4,5	12 и 25	
19	Carl Zeiss, Jena	R-Biotar	1:0,85	5,5	Для кинорентгено-съемки
20		Tele-Tessar	1:6,3	12—40	
21		Kino-Tele-Tessar	1:4	7,5, 10 и 15	Для кино-съемок
22		Dagor	1:6,8	18—36	
23		Dagor	1:9	7,5—24	
24		Hypergon	1:22	6,75 и 12	
25	Zeiss-Ikon Dresden	Frontar	1:11	5—15	Для кино-съемок
26		Frontar	1:9	8 и 12	
27		Dominar	1:4,5	10,5—16,5	
28		Novar	1:6,3	10,5—16,5	
29		Ernostar	1:3,5	14	
30		Ernostar	1:1,8	8,5	
31	Julius Laack Rathenow	Ernostar	1:2	5 и 8,5	Для кино-съемок
32		Polixentar	1:4,5	7,5—30	
33		Dialytar	1:2,7	1,5—16,5	
34		Dialytar	1:3,5	3,5—30	
35		Dialytar	1:4,5	2,5—40	Для кино-съемок
36		Dialytar	1:6,3	7,5—40	
37		Pololyt	1:4,5	7,5—16	
38		Kino	1:2	1,5—8,5	
39		Persor-Aplanate	1:11	7,5—28	Для кино-съемок
40		Doppel-Anastigmat Dialytar	1:3,5	7,5—30	
41	Julius Laack Rathenow	Doppel-Anastigmat Dialytar	1:4,5	7,5—36	Широко-угольный
42		Doppel-Anastigmat Dialytar	1:6,3	7,5—21	
43		Doppel-Anastigmat Dialytar	1:8,7	7,5—25	
44		Tele-Anastigmat	1:6,3	20, 24 и 24	

(Продолжение табл.).

№ по пор.	Наименование фирмы	Название объектива	Относительное отверстие	Фокусное расстояние (в см)	Примечание
45	Rodenstock, München	Eurynar	1:3,5	10,5—18	Широко-угольный
46		Eurynar	1:4,5	13,5—30	
47		Eurynar	1:6,5	9—60	
48		Trinar	1:6,3	10,5—16,5	
49		Trinar	1:4,5	10,5—16,5	
50		Eurigon	1:4,5	21—60	
51		Eurigon	1:12	9—75	
52		Isar	1:4,5	7,5—48	
53	Hugo Meyer C°, Görlitz	Doppel-Plasmat	1:4	5,3—48	Для кино-съемок
54		Doppel-Plasmat	1:5,5	6—48	
55		Satz-Plasmat	1:4,5	7,5—18	
56		Kino-Plasmat	1:1,5	2—9	
57		Kino-Plasmat	1:2	2,2—12,5	
58		Reproduktions-Plasmat	1:8	35—85	
59		Makro Plasmat	1:2,9	2,6—30	
60		Aristostigmat	1:5,5	4,5—24	
61		Ari tostigmat	1:6,8	4—16,5	
62		Aristostigmat	1:9	8—27	
63		Doppel-Anastigmat	1:6,8	4—30	
64		Euryplan	1:6	6—18	
65		Trioplan	1:3	7,5—18	
66		Rapid-Gruppen-Aristoskop	1:5,5	12—65	
67		Aristoplanat	1:7,7	10,5—45	
68	Voigtlander, Braunschweig	Voigtar	1:6,3	9—13,5	Для кино-съемок
69		Skopar	1:4,5	8,3—16,5	
70		Portrait-Heliostigmat	1:2,5	21—33,5	
71		Kino-Heliostigmat	1:2,5	3,5—10	
72		Heliar	1:3,5	2—30	
73		Heliar	1:4,5	3,5—60	
74		Dynar	1:5,3	5,5—30	
75		Collinear	1:6,3	7,5—52	
76		Kino-Tele-Anastigmat	1:4,5	14,5—20 и 23	
77		Tele-Dynar	1:6,3	14—32	
78	C. Steinheil, München	Weitwinkel-Collinear	1:12,5	10,5—32	Для кино-съемок
79		Apochromat-Collinear	1:9 и 1:12,5	20—100	
80	C. Steinheil, München	Cassar	1:3,5	5,4—36	Широко-угольный
81		Cassar	1:5	7,5—70	
82		Unofocal	1:4,5	7,5—40	
83		Unofocal	1:5,4	7,5—18	
84		Unofocal	1:6	7,5—30	

(Продолжение табл.).

№ по пор.	Наименование фирмы	Название объектива	Относительное отверстие	Фокусное расстояние (в см.)	Примечание
85	C. Steinheil, München	Unofocal	1:6,8	7,5—18	
86		Satz-Orthostigmat	1:6	9—30	
87		Orthostigmat	1:6,8	5,4—60	
88		Orthostigmat	1:10	50—90	
89		Apochromat-Orthostigmat	1:9	36—90	
90		Astinar	1:4,5—1:6,3	10,5—16	
91	E. Busch, Rathenow	Nicola-Perscheid—objektiv	1:4,5	7,5—60	Портретный Для кино- съемок
92		Glyptar-Anastigmat	1:3,5	2,5—7,5	
93		Glyptar-Anastigmat	1:4,5	10—40	
94		Leukar-Doppel-Anastigmat	1:6,8	9—45	
95		Glaukar-Anastigmat	1:3,1	3—40	
96		Bi-Tel r	1:7—1:7,7	20—55	
97		Weitwinkel-Aplanat	1:15	10,5—24	
98		Rapid-Aplanat	1:7—1:8	20—60	
99	R o s s, L o n d o n	Expres Lens	1:2,9	2,5—25	Для кино- съемок
100		Expres Lens	1:3,5	5—16,5	
101		Expres Lens	1:4,5	7,5—53,3	
102		Homocentric Lens	1:5,6	30—61	
103		Homocentric Lens	1:6,3	12,5—38	
104		Homocentric Lens	1:6,8	5,5—35,5	
105		Homocentric Lens	1:8	18—61	
106		Cinoross Lens	1:1,9	2,5—7,5	Для кино- съемок
107		Wide-Angle Lens	1:16	8,5—32	
108		Apochromatic Process Lenc	1:10—1:16	40—113	
109		Combinable Lens	1:5,5—1:6,3	10—53	
110	S c h n e i d e r — K r e u z n a c h	Teleros Lens	1:5,5	16—100	
111		Teleros Lens	1:6,3	22—72	
112		Xenar	1:3,5	3,5—12,5	Для кино- съемок
113		Xenar	1:4,5	7,5—28	
114	S c h n e i d e r — K r e u z n a c h	Xenar	1:5,5	10,5—40	
115		Da-ykar	1:12,5	20—80	
116		Xenon	1:1,8	2—8,5	Для кино- съемок
117		Radionar	1:6,3	12,5—32	
118		Tele-Xenar	1:5,5	15—38	
119	E. Leitz, Wetzlar	Elmar-Anastigmat	1:3,5	3,5—5,0 и 7,5	Могут быть употреблены для кино
120		Hektor	1:2,5	5,0	
121		Summar	1:2	3 и 5	
122		Elmar	1:4,5	3,5—5—7,5	

(Продолжение табл.)

№ по пор.	Наименование фирмы	Название объектива	Относительное отверстие	Фокусное расстояние (в см.)	Примечание
123	S. O. M., Paris	Stellor	1:3,5	5—18	
124		Color	1:4	7,5—24	
125		Olor	1:6,8	12,5—30	
126		Eurygraphes	1:6	7,5—40	
127		Eurugraphes	1:12	8,5—30	
128	Dallmeyer, Англия	Dallon—Telephoto	1:3,5	5—18	
129		Dalmag	1:3,5	3—12,5	Для кино- съемок
130		Popular	1:6	7,5—24	
131		Perfac—Lenses	1:6,3	10,5—28	
132		Pentac—Lenses	1:2,9	—	
133		Stigmatic—Lenses	1:6	12,5—40	
134	Astro—Neuköln	Tachar-Pan	1:1,8	3—8,5	Для кино- съемок
135		Tachar-Pan	1:2,3	3—12,5	
136		Tachar-Pictorial	1:1,8	5—10,5	
137		Tachar-Standart	1:2,3	3,5—12,5	
138		Astro-Ostar	1:3,5	12,5—13,5	
139		Tachon	1:0,95	3—8,5	Для кино- съемок
140	Agfa	Anastigmat serie K	1:7,7	10,5—38	
141		Anastigmat serie L	1:6,3	7,5—28	
142		Anastigmat serie M	1:4,5	7,5—18	
143	E. Krauss, Paris 1	Tessar	1:2,7	2—7,5	Для кино- съемок
144		Tessar	1:3,5	7,5—30	
145		Tessar	1:4,5	7,5—28	
146		Tessar	1:6,3	13—40	
147		Protar	1:18	4—20	
148		Double-Protar	1:7,7	10,5—40	
149	Bausch-Lomb, Rochester 1	Protar	1:18	4—27	
150		Protar	1:12,5	13—40	
151		Tessar	1:3,5	7,5—30	
152		Tessar	1:4,5	7,5—28	
153		Tessar	1:6,3	12—40	
154	Taylor, Англия	Plastigmat	1:5,6	7,5—32	Для кино- съемок
155		Rapid-Anastigmat-Raytar	1:2,7	3—12,5	
156		Optic-series O	1:2	3,5—13,7	
157		Speedik series X	1:2,5	13—24	
158		Portrellis series II	1:4,5	7,5—30	
159		Aviar	1:4,5	24—60	
160		Rrocess-Apochromatic	1:16	20—70	

1 Фирмы „Краус“ (Франция) и „Бауш-Ломб“ (Америка) изготовляют фото-объективы по расчетам фирмы К. Цейсса.

(Продолжение табл.)

№ по пор.	Наименование фирмы	Название объектива	Относительное отверстие	Фокусное расстояние (в см)	Примечание
161	C. Götz, Berlin 2	Dagor	1:6,8	4—75	
162		Celor	1:4,5	5—27	
163		Syntor	1:6,8	12—21	
164		Hypar	1:3,5	30—36	
165		Hypar	1:4,5	36—60	
166		Pantar	1:6,3	8,6—27,6	
167		Artar	1:9	30 и 36	
168		Artar	1:11	48—75	
169		Artar	1:12,5	90 и 120	
170		Hypergon	1:22	6—20	
171	C. Götz, Berlin 2	Extra-rapid-Lynkeiskop	1:6,3	6—90	
172		Rapid-weitwinkel Lynkeiskop	1:7,7	6—30	

² В настоящее время фирма „Герц“ в связи с кризисом прекратила свое существование в Германии. Объективы Dagor и Hypergon по расчету Герца выпускает фирма К. Цейсса.

Примечание. В главе V приведены оптические данные в виде диаграмм, на которых указаны сферическая абберация, условие синусов, астигматизм, дисторсия и т. д. для следующих киносъёмочных объективов: Бек-Лондон — объектив 1912 г., рис. 94; тессар Цейсса, рис. 101; анастигмат Росса, рис. 103; биотессар Цейсса, рис. 104; анастигмат Рудольфа, рис. 117; биотар Цейсса, рис. 119; киноплазмат Мейера, рис. 122; эристар Эрнемана, рис. 120, и биотар Цейсса 1:1,4, рис. 121.

Указатель литературы

1. Harting, Die photographische Optik. Berlin 1925.
2. Turriere E., Optique industrielle, Paris 1920.
3. Rohr M., Theorie und Geschichte des photographischen Objectivs, Berlin 1899.
4. Handbuch der wissenschaftlichen und angewandten Photographie, Band I — Das photographische Objectiv, Wien 1932.
5. Кислов Н. М., Теория оптических инструментов, Москва 1915.
6. Майзель С. О., Свет и зрение, 1932.
7. Тудоровский А. И., Основания общей теории оптических приборов, Ленинград 1933.
8. Берек М., Основы практической оптики, Москва 1933.
9. Игнатовский В. С., Элементарные основы теории оптических приборов, Ленинград 1933.
10. Петров В. В., Конспект лекций по фотооптике, литографирующее издание, ГИК, Москва 1931.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ГЛАВА I. Основные свойства света	
1. Природа лучистой энергии	5
2. Распространение лучистой энергии	9
3. Законы отражения	10
Отражение от плоской поверхности	—
Отражение от сферической поверхности	11
4. Преломление света	14
5. Дисперсия света	16
6. Световой поток, освещенность, яркость и сила света	18
ГЛАВА II. Элементы геометрической оптики	
1. Оптическое стекло	20
2. Линзы и призмы	23
3. Преломление света в линзах и призмах	25
4. Фокусные расстояния	29
5. Определение главных точек и главных плоскостей	35
6. Построение изображений	36
7. Диафрагмы в фотографических объективах и их назначение	39
8. Система из нескольких линз	41
ГЛАВА III. Элементы глазной оптики	
1. Устройство глаза	43
2. Акт зрения	44
3. Разрешающая сила глаза	46
4. Стереоскопическое видение	47
ГЛАВА IV. Недостатки изображения объективов	
1. Понятие об абберациях	49
2. Сферическая абберация — продольная и поперечная	50
3. Условие синусов	51
4. Астигматизм	53
5. Кома. Абберация наклонных пучков	55
6. Дисторсия. Условие ортоскопии	57
7. Хроматическая абберация	60
ГЛАВА V. Описание фотокинообъективов	
1. Краткая история развития фотографического объектива	66
2. Описание различных типов фотографических объективов и оценка их качества	70
3. Простейшие фотообъективы	75
4. Двухлинзовые объективы	77
5. Половинки симметричных объективов как самостоятельные фотообъективы	79
6. Трехлинзовые фотообъективы	83
7. Дальнейшее развитие трехлинзового объектива	88

	Стр.
8. Двойные фотообъективы	93
9. Объективы наибольшей светосилы	101
10. Телеобъективы	106
11. Фотообъективы с переменным фокусным расстоянием	109
12. Советские фотообъективы	111
13. Производство фотокинообъективов	112

ГЛАВА VI. Оптические свойства фотообъективов

1. Фокусное расстояние объектива и величина изображения	119
2. Поле зрения и поле изображения	120
3. Светосила объектива и его относительное отверстие	122
4. Резкость изображения	127
5. Глубина изображаемого пространства	128

ГЛАВА VII. Оптические добавления и насадки на фотокинообъективы

1. Применение дополнительных линз для увеличения или уменьшения изображения	132
2. Насадочные линзы для получения мягкого рисунка	136
3. Светофильтры	137
4. Зеркала, призмы и прочие добавления	138

ГЛАВА VIII. Испытание и исследование фотокинообъективов

1. Характер и задачи испытания объективов	140
2. Лабораторный метод испытания	141
Определение диаметра входного отверстия фотообъектива	145
Определение эквивалентного фокусного расстояния фотообъектива	—
Определение сферической и хроматической аберраций	146
Оценка качества изображения и разрешающей способности	148
3. Испытание фотообъективов непосредственно в фотоаппарате	151
4. Стандартный метод испытания объективов	153

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Правила ухода и хранения фотообъективов	157
2. Сводная таблица наиболее распространенных фотокинообъективов	158
3. Указатель литературы	162

Редактор издательства Б. Прокофьев.

Технический редактор В. Зверин.

Сдано в производство 3/II—35 г., подписано к печати 6/V—1935 г. Формат бумаги 82×94¹/₁₆. 10¹/₄ п. л. Количество печ. зн. в 1 л. 43 600.

Тираж 3 000.

Уполн. Главлита В—22605

Наряд № 3039

В типография Мособлполиграфа, улица Фридриха Энгельса, 46.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
28	15-я сверху	$... = \frac{\delta + \alpha}{1}$	$... = \frac{\delta + \alpha}{2}$
31	1-я снизу	$\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_0} \quad (21)$	$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_0} \quad (21)$
47	9-я снизу	расстояние ...	расстояниях от наблюдателя.
63	12-я сверху	... 13,50	... 135,0
72	14-15 снизу	... в отношении дисперсии...	... в отношении дисторсии...

В. Петров. Оптика фотографического объектива.